



## Udvikling og demonstration af beregningsværktøj til industrielle tørreprocesser "DryPack"

Schneider, Peter; Weinkauff Kristoffersen, Jesper; Blazniak Andreassen, Marcin ; Elmegaard, Brian; Kærn, Martin Ryhl; Monrad Andersen, Christina; Grony, Kim; Stihøj, Allan

*Publication date:*  
2013

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Schneider, P., Weinkauff Kristoffersen, J., Blazniak Andreassen, M., Elmegaard, B., Kærn, M. R., Monrad Andersen, C., Grony, K., & Stihøj, A. (2013). *Udvikling og demonstration af beregningsværktøj til industrielle tørreprocesser "DryPack"*. Teknologisk Institut.

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



TEKNOLOGISK  
INSTITUT

# Udvikling og demonstration af beregningsværktøj til industrielle tørreprocesser "DryPack"

*PSO projekt nr.: 342-028*

*Marts 2013*

*Peter Schneider, Teknologisk Institut*

*Jesper Weinkauff Kristoffersen, Teknologisk Institut*

*Marcin Blazniak Andreassen, Teknologisk Institut*

*Brian Elmegaard, DTU MEK*

*Martin Kærn, DTU MEK*

*Christina Monrad Andersen, Lokal Energi*

*Kim Grony, SE Big Blue*

*Allan Stihøj, Enervision*

## **Forord**

Rapporten er dokumentationen for PSO projektet ” Udvikling og demonstration af ’DryPack’ - energibesparelser på industrielle tørreanlæg”, j.nr. 343-028.

Projektet er udført i perioden 1. januar 2010 til 31. december 2012.

Deltagerne i projektet var:

Christina Monrad Andersen, Lokal Energi A/S

Allan Stihøj, Enervision A/S

Kim Grony, SE Big Blue A/S

Svend Erik Mortensen, Skamol A/S

Dorte Balslev, Arkil A/S

Lars Nielsen, Vestjyllands Andel A/S

Peter Schneider, Køle og Varmepumpeteknik, Teknologisk Institut

Jesper Weinkauff Kristoffersen, Køle og Varmepumpeteknik, Teknologisk Institut

Marcin Blazniak Andreasen, Køle og Varmepumpeteknik, Teknologisk Institut

Aarhus, februar 2013

Peter Schneider

Teknologisk Institut

Køle & Varmepumpeteknik

## Indholdsfortegnelse

Forord .....	2
1 Indledning .....	4
2 Energiforbrug for forskellige tørretyper .....	5
2.1 Simpel tørreproces .....	7
2.1.1 Tørreprocessen i et IX-diagram .....	7
2.2 Energiforbruget i en tørreproces .....	8
3 Beskrivelse af ”DryPack” .....	10
3.1 Beregning af termodynamiske egenskaber af fugtig luft .....	10
3.2 Enhedsoperationer for fugtig luft .....	11
3.3 IX diagram for temperaturer over 100°C .....	16
3.4 Beregning af energiforbruget for kontinuerlige tørreprocesser .....	17
3.4.1 Ad 1) Simpel tørreproces .....	17
3.4.2 Ad 2) Tørreproces med recirkulation af tørreluft .....	18
3.4.3 Ad 3) Regenerativ opvarmning af indgangsluft med luftforvarmer .....	19
3.4.4 Ad 4) Tørreproces med vandgenvindingssystem .....	20
3.4.5 Ad 5) Tørreproces med varmepumpe .....	21
3.4.6 Ad 5) Tørreproces med overheded vanddamp .....	22
3.5 Batchtørrer program .....	24
3.5.1 Geometri .....	25
3.5.2 Ventilator og temperatur styring .....	26
3.5.3 Beregning af tørretid .....	29
4 Cases – praktisk anvendelse af ”DryPack” .....	33
4.1 Case 1 Arkil, asfalttørrer .....	33
4.1.1 Forslag til energioptimering hos Arkil .....	34
4.2 Case 2 -Vestjyllands Andel, korntørrer .....	36
4.2.1 Forslag til energioptimering hos Vestjyllands Andel .....	37
4.3 Case 3 – Skamol, batch tørrer .....	41
4.3.1 Simulering af målesituation .....	44
4.3.2 Kommentarer til output .....	45
5 Konklusion .....	46

# 1 Indledning

Projektets formål er at udvikle et beregnings- og analyseværktøj, ”DryPack”, som kan anvendes til at finde energibesparelser på en lang række udbredte industrielle tørreprocesser samt beskrive og beregne energioptimeringsmuligheder på projektdeltagernes tørreanlæg. ”DryPack” er relevant for energirådgivere, udstyrsleverandører og brugere af tørreprocesser, og det vil frit kunne downloades af alle efter projektets afslutning.

Der findes generelt mange håndbøger, artikler og viden om specifikke tørreprocesser, men der mangler et brugervenligt værktøj, som hurtigt og enkelt kan anvendes til at analysere og optimere produkt- og energiflow i de hyppigst anvendte tørreprocesser for derigennem at finde energibesparelser. Energibesparelspotentialet på industrielle tørreprocesser er stort.

I en nyligt afsluttet analyse<sup>1</sup> vurderes det, at der kan spares ca. 1200 GWh på industrielle tørreprocesser til varmeenergi og 140 GWh til elforbrug i et segment, der bruger ca. 20% af industriens energi. Energiforbruget udgør ofte den største driftsomkostning i produktioner, hvor der indgår tørring. Med stigende energipriser i udsigt og øget fokus på klimaforandringer, er energibesparelser derfor højt prioriteret i tørrebranchen.

Projektgruppen består af aktører fra hele værdikæden og omfatter et bredt udpluk af industrielle tørreprocesser.

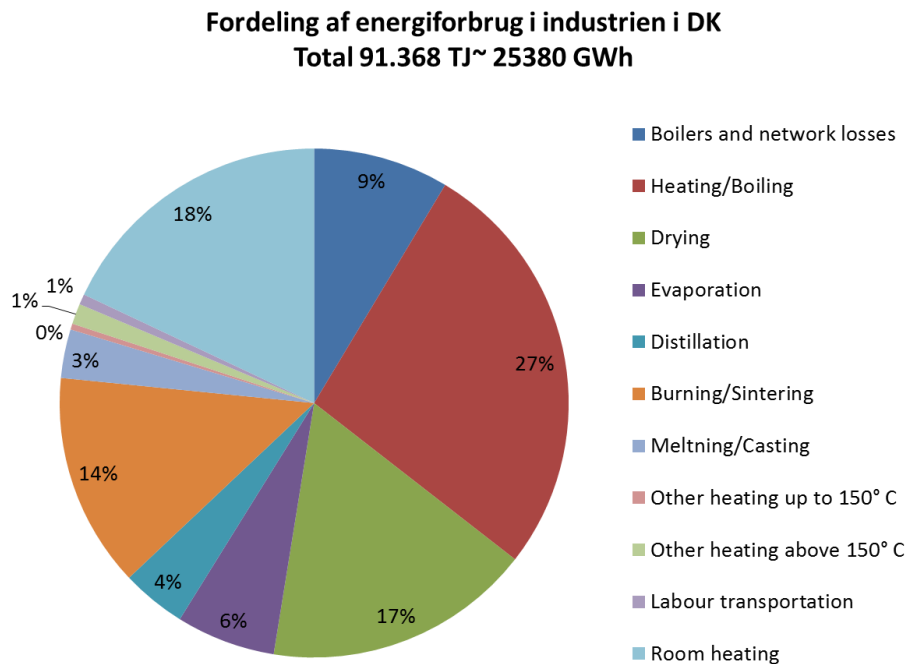
Det forventes, at ”Drypack” vil blive standard værktøjet til analyse af tørreprocesser for rådgivere og slutbrugere, idet programmet vil være frit tilgængeligt til download fra Teknologisk Instituts og ELFORSKs hjemmesider.

---

<sup>1</sup> ”Energibesparelser i Erhvervslivet, april 2009” - udarbejdet for Energistyrelsen.

## 2 Energiforbrug for forskellige tørretyper

Tørring er en proces, hvor der sker en fordampning af vand fra et produkt under tilførsel af varme. Tørring er en meget energikrævende proces, da der skal tilføres 2300 kJ varme for at fordampe et kilo vand. Dette fremgår også af figur 1, der viser fordelingen af energiforbruget for den danske industri fordelt på forskellige processer. Af figuren fremgår det, at tørring udgør ca. 17% af den danske industris energiforbrug.



Figur 1 Fordeling af energiforbruget i den danske industri.

De primære grunde til at tørre et produkt er:

- Reducering af transportomkostninger, idet vægten reduceres ved tørring
- At gøre et materiale mere håndterligt, f.eks. pulver
- At gøre et organisk lager stabilt (undgå forrådnelse)

Dryer types	Typical energy consumption		
	[kJ/kg water]	[kcal/kg water]	[MWh/ton]
<b>Convection dryers</b>			
Conveyer dryers	4000-6000	957-1435	1,1-1,7
Tunneldryers	5500-6000	1316-1435	1,5-1,7
Owens	5000-5800	1196-1388	1,4-1,6
Rotorowen	4500-9000	1077-2153	1,3-2,5
Fluid bed	4000-6000	957-1435	1,1-1,7
Flash	4500-9000	1077-2153	1,3-2,5
Spray	4500-11500	1077-2751	1,3-3,2
Steam			
Vacuum	2900-4600	694-1100	0,8-1,3
Atmospheric	2500	598	0,7
High pressure	2500	598	0,7
Heat pump	500-1100	120-263	0,1-0,3
<b>Contact dryers</b>			
Drum	3200-6500	766-1555	0,9-1,8
Roller	2900-5700	694-1364	0,8-1,6
Spiraltube	3400	813	0,9
Screw	3400-5600	813-1340	0,9-1,6
<b>Gas based infra red dryers</b>	3500-9500	837-2273	1,0-2,6
<b>Radiant dryers</b>			
Radiofrequency	5300	1268	1,5
Microwave	6400	1531	1,8
Freeze drying	10000	2392	2,8
Infrared	3300-5600	789-1340	0,9-1,6

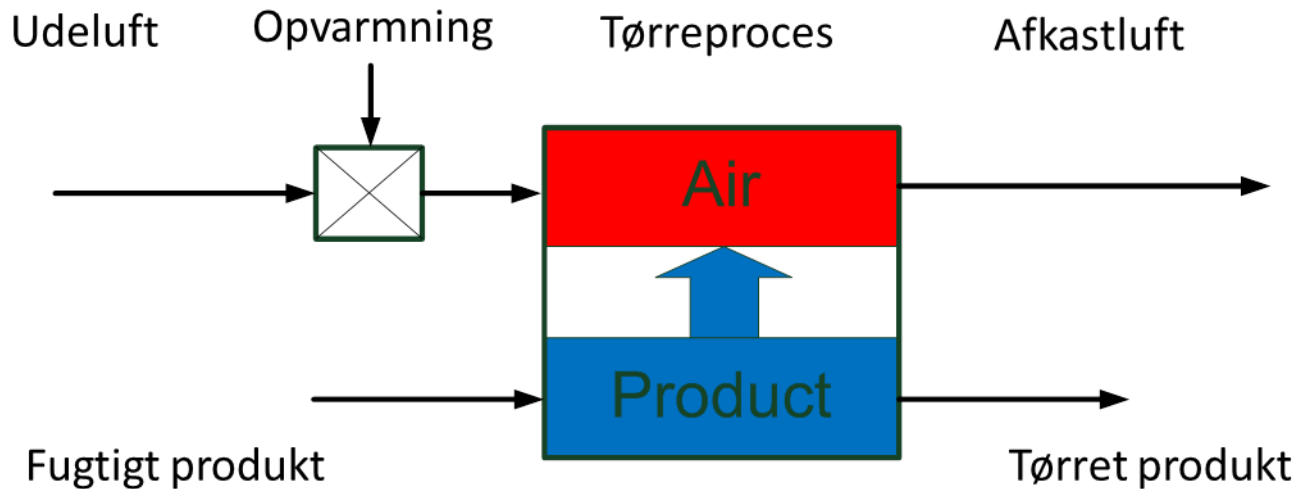
Figur 2 Energiforbruget for forskellige tørretyper.

De mest energieffektive tørreprocesser er med overhededt damp og rekompresion, hvor energiforbruget kan være 5-10 gange lavere end de mest energieffektive tørreprocesser med luft, se figur 2.

Nedenstående tommelfingerregler er søgt anvendt i "DryPack" for at finde energibesparelser:

- Maksimal afvanding før tørring/minimal vandtilsætning
- Små produkter tørres hurtigere end store → reducerer tørretid og tomgangsforbrug
- Tørremidiet skal bestryge produktet, undgå bypass
- Reducer afkasttemperaturen mest muligt (recirkulation eller reducer flow)
- Recirkulation af tørreluft for at øge vandindholdet (reduktion af friskluft mængden)
- Reduktion af varmetab ved isolering/utætheder

## 2.1 Simpel tørreproces

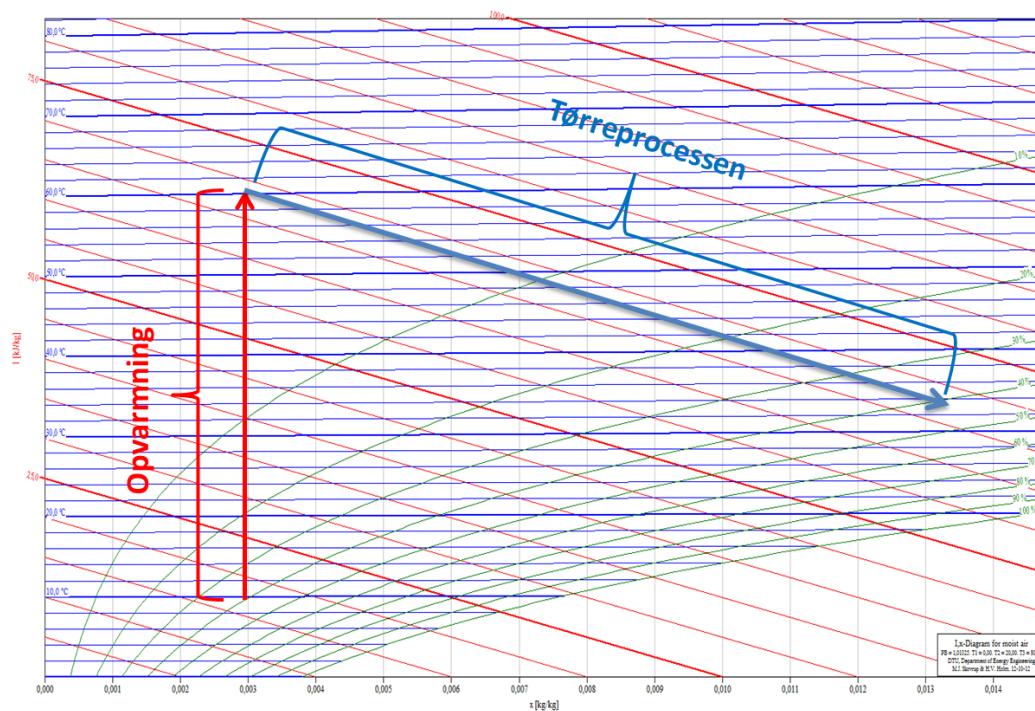


Figur 3 Skitse af en simpel tørreproces

Figur 3 viser en skitse af en tørreproces, hvor udeluften opvarmes i en varmeveksler og derefter ledes gennem tørreprocessen. Den opvarmede udeluft optager vand fra det fugtige produkt, hvorved det tørres.

### 2.1.1 Tørreprocessen i et IX-diagram

I figur 4 er luftens tilstandsændring i en tørreproces vist i et IX diagram.



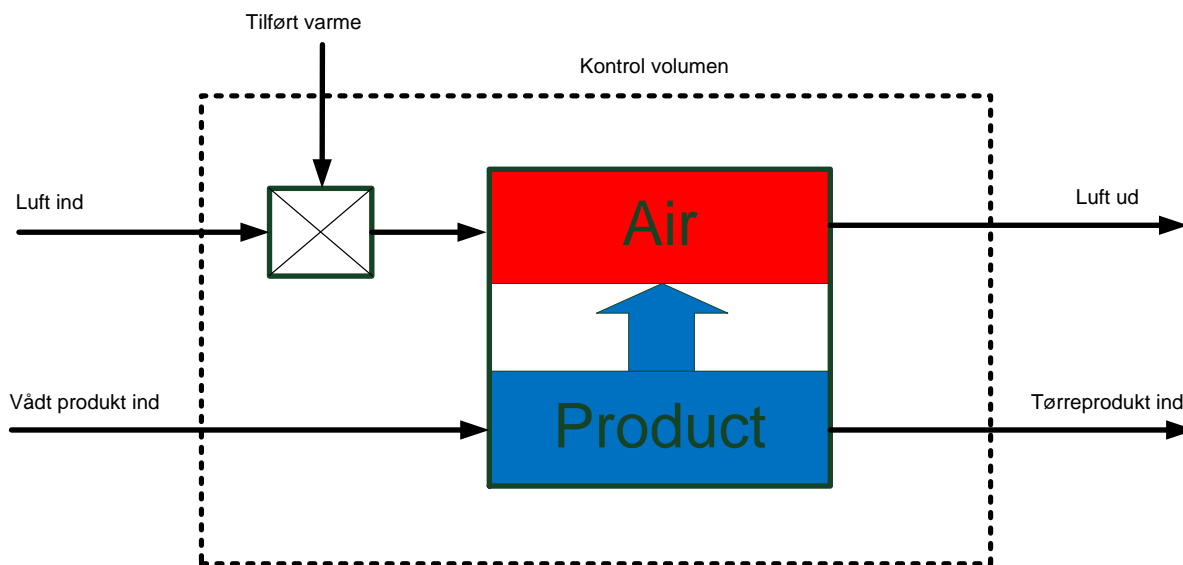
Figur 4 Tørreprocessen indtegnat i et IX diagram



I en tørreproces virker luften både som varmeafgiver og som fugttransportør. Udeluften varmes op ved konstant fugtindhold i en varmeveksler eller ved direkte kontakt med for eksempel naturgas, som forbrændes direkte ind i luften. Når luften har opnået den ønskede tørretemperatur, ledes den ind i tørreren, hvor den opvarmer det våde produkt, således at der sker en fordampning af vandet fra produktet til tørreluften. Luftens fugtindhold vil herved stige. Luftens temperatur vil ændre sig med konstant enthalpi (teoretisk).

## 2.2 Energiforbruget i en tørreproces

Energiforbruget i en tørreproces kan beregnes ved at lægge et kontrolvolumen rundt om tørreren, se figur 5.



Figur 5 Kontrolvolumen omkring tørreproces.

Ved anvendelse af termodynamikkens første hovedsætning samt loven om massebevarelse kan følgende sæt ligninger opstilles for at bestemme energiforbruget af en aktuel tørreproces:

Massebevarelsen giver:

$$\text{Vand ind} = \text{Vand ud}$$

$$M_{pi} \cdot X_{pi} + M_{air} \cdot x_{airi} = M_{po} \cdot X_{po} + M_{air} \cdot x_{airo}$$

$M_{pi}$  = Massestrømmen af det våde produkt ind i tørreren [kg/s]

$X_{pi}$  = Vandindholdet i produktet ind i tørreren [%]

$M_{po}$  = Massestrømmen af det våde produkt ud i tørreren [kg/s]

$M_{air}$  = Massestrømmen af tør luft [kg/s]

$x_{airi}$  = Fugtindholdet i luften ind i tørreren [kg/kg]

$x_{airo}$  = Fugtindholdet i luften ud af tørreren [kg/kg]

*Energibevarelsen giver:*

$$M_{pi} \cdot C_{pi} \cdot T_{pi} + M_{air} \cdot I_{airi} + Q = M_{po} \cdot C_{po} \cdot T_{po} + M_{air} \cdot I_{airo}$$

$C_{pi}$  = Varmefylden af det våde produkt ind i tørreren [kJ/kgK]

$T_{pi}$  = Temperaturen af det våde produkt ind i tørreren [°C]

$I_{airi}$  = Enthalpien af den tørre luft ind i tørreren [kJ/kg]

$Q$  = Tilført effekt i varmeveksleren der opvarmer luften [kW]

$C_{po}$  = Varmefylden af det våde produkt ud af tørreren [kJ/kgK]

$T_{po}$  = Temperaturen af det våde produkt ud af tørreren [°C]

$I_{airo}$  = Enthalpien af den tørre luft ud af tørreren [kJ/kg]

Ovenstående ligninger anvendes i "DryPack" til at bestemme den fordampede mængde vand fra det tørrede produkt samt til at bestemme den tilførte effekt til tørreprocessen.

For at kunne sammenligne de forskellige tørreprocesser introduceres det specifikke energiforbrug, SPEC, som er et udtryk for den mængde energi, der skal anvendes for at fordampe et kilo vand.

Vands fordampningsvarme er 2300 kJ/kg, hvilket betyder, at energiforbrug højere end denne værdi er et udtryk for at tørreprocessen er ineffektiv eller at der forekommer tab i processen.

### 3 Beskrivelse af "DryPack"

Programmet består af fire separate programmer:

1. Beregning af termodynamiske egenskaber af fugtig luft
2. Enhedsoperationer for fugtig luft
3. IX diagram for temperaturer over 100°C
4. Beregning af energiforbruget for Batch tørreprocesser
5. Beregning af energiforbruget for kontinuerlige tørreprocesser

#### 3.1 Beregning af termodynamiske egenskaber af fugtig luft

I figur 6 ses brugerfladen for programmet, der omregner de termodynamiske egenskaber af fugtig luft.

#### Calculation of properties of Moist air

Input	
<input type="radio"/> Dry Bulb and Wet Bulb	
<input type="radio"/> Dry Bulb and Dew Point	
<input type="radio"/> Dry Bulb and Enthalpy	
<input type="radio"/> Dry Bulb and Humidity ratio	
<input checked="" type="radio"/> Dry Bulb and Relative Humidity	

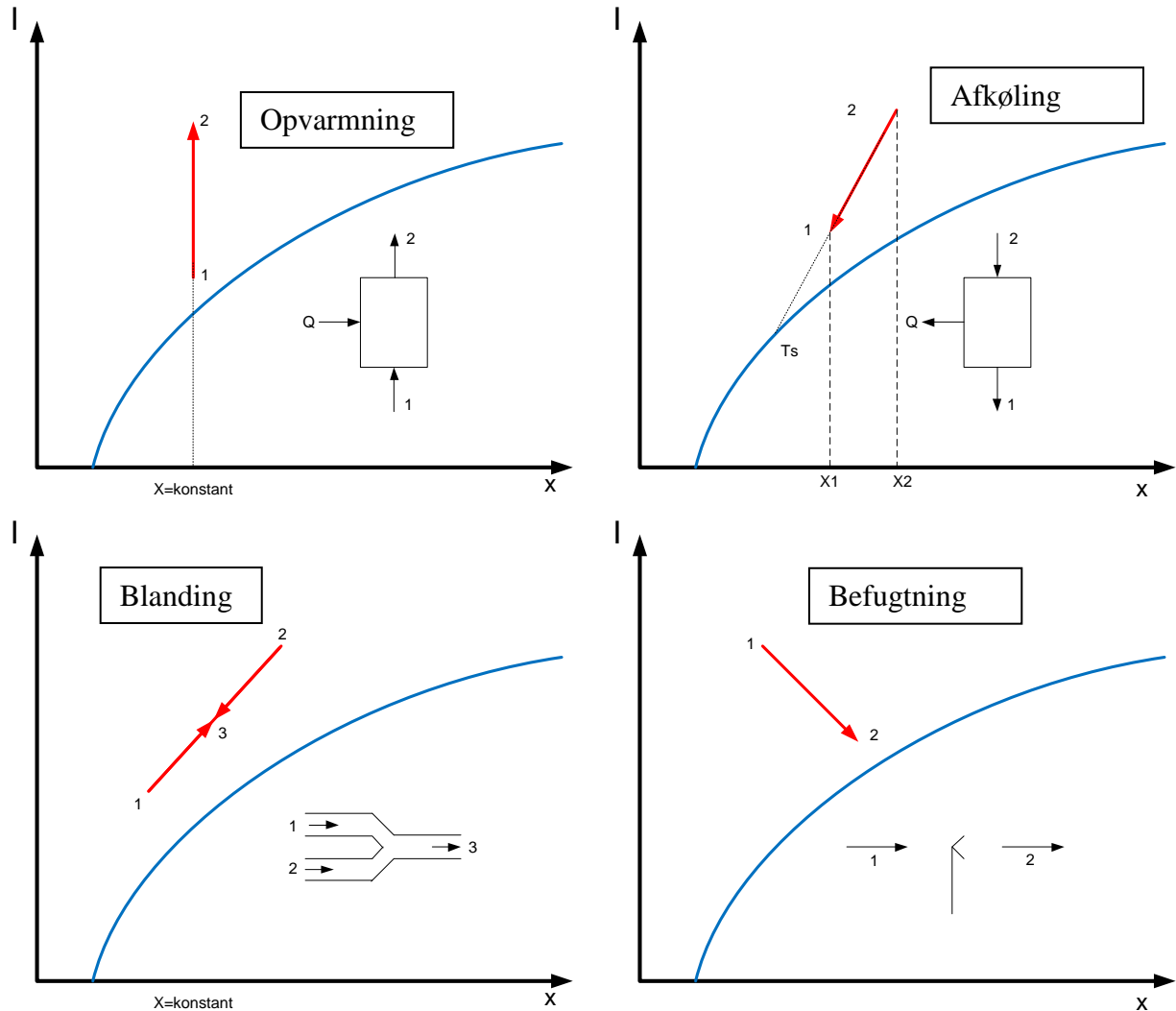
Input	
Dry Bulb Temperature	<input type="text" value="20"/> [°C]
Relative Humidity	<input type="text" value="20"/> [%]
Pressure	<input type="text" value="1,013"/> [Bar]

Output	
Dry Bulb Temperature	$T_{db} = 20$ [°C]
Wet bulb Temperature	$T_{wb} = 20$ [°C]
Dew Point Temperature	$T_{dew} = 20$ [°C]
Enthalpy	$I = 57,44$ [kJ/kg]
Humidity ratio	$w = 0,0147$ [kg/kg]
Relative Humidity	$RH = 100$ [%]
Specific Volume	$V = 0,8503$ [m <sup>3</sup> /kg]

Figur 6 Beregning af termodynamiske egenskaber for fugtig luft.

### 3.2 Enhedsoperationer for fugtig luft

Dette program udfører beregninger på henholdsvis opvarmning, afkøling, blanding og befugtning af fugtig luft.



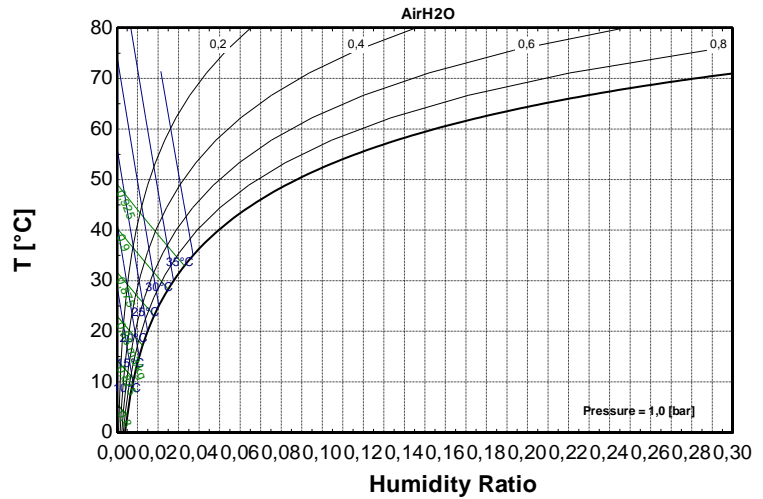
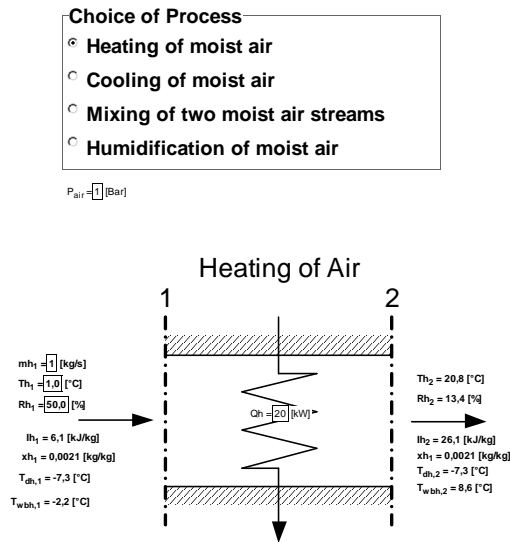
Figur 7 Enhedsoperationer med fugtig luft.

Figur 7 viser de enhedsoperationer, der kan beregnes i programmet:

- Opvarmning af fugtig luft
- Afkøling af fugtig luft
- Blanding af to luftstrømme
- Befugtning af fugtig luft

## Opvarmning af fugtig luft

### Psychrometric Processes of moist air



Figur 8 Opvarmning af fugtig luft.

Figur 8 er et skærmbillede for beregning af opvarmning af fugtig luft.

Input til programmet er:

- Massestrømmen af luften
- Lufttemperatur
- Relativ fugtighed
- Overført ydelse i varmeveksleren.

Programmet beregner selv de resterende tilstandstørrelser af luften henholdsvis før og efter varmeveksleren.

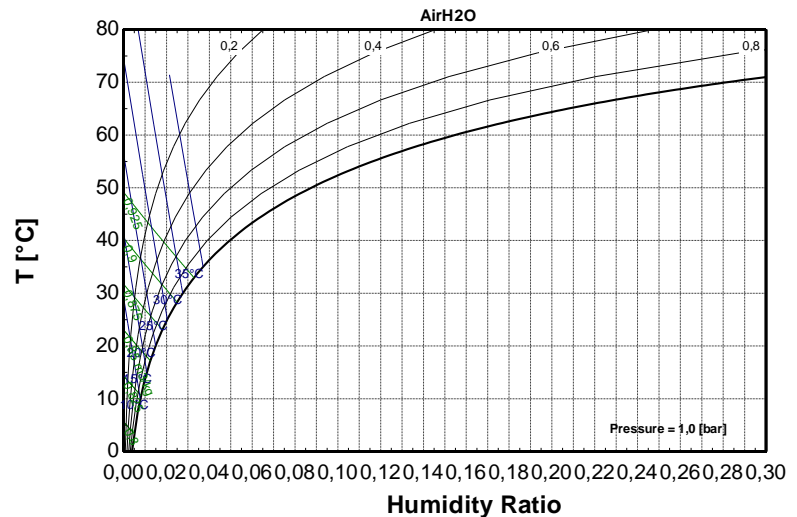
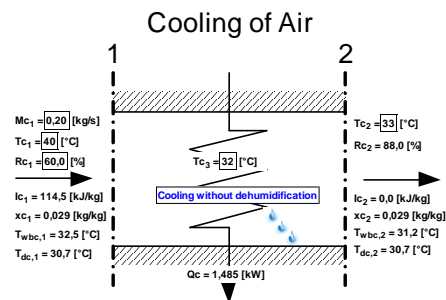
## Afkøling af fugtig luft

### Psychrometric Processes of moist air

#### Choice of Process

- ☐ Heating of moist air
- ☒ Cooling of moist air
- ☐ Mixing of two moist air streams
- ☐ Humidification of moist air

$P_{air} = 1$  [Bar]



Figur 9 Afkøling af fugtig luft.

Figur 9 er et skærbillede for beregning af afkøling af fugtig luft.

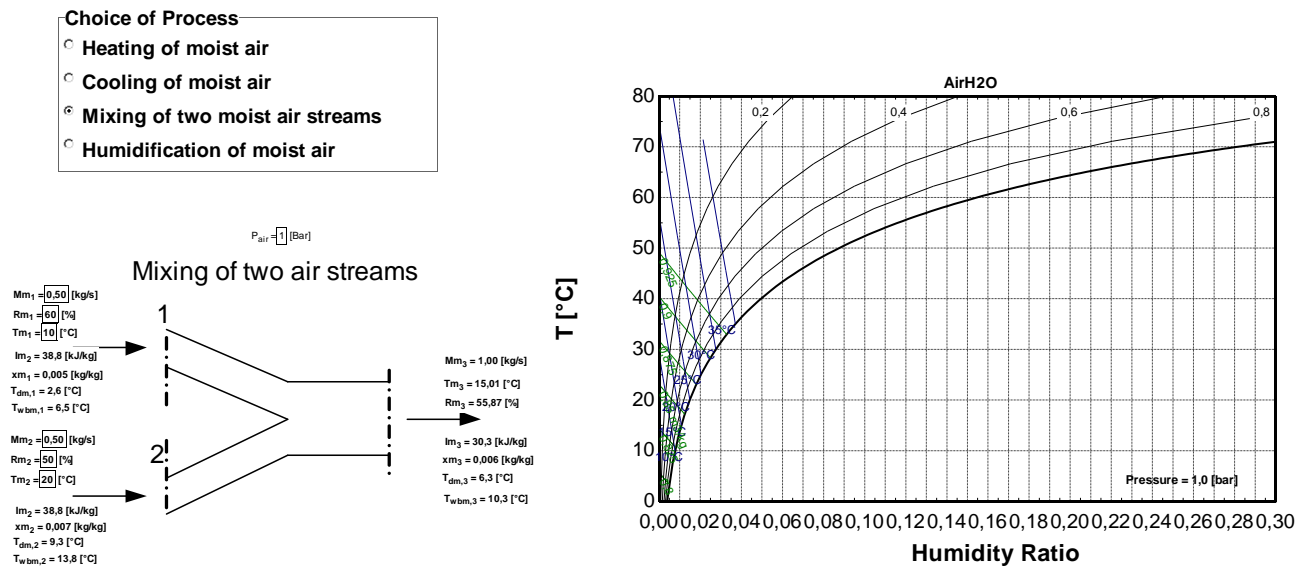
Input til programmet er:

- Massestrømmen af luften
- Lufttemperatur (før og efter varmeveksleren)
- Relativ fugtighed
- Overflade temperaturen på varmeveksler. Er denne temperatur lavere end tilgangsluftens dugpunktstemperatur, udkondenseres der vand på varmevekslerens overflade.

Programmet beregner selv de resterende tilstandsstørrelser af luften henholdsvis før og efter varmeveksleren, massestrømmen af det udkondenserede vand og ydelsen af varmeveksleren.

## Blanding af to luftstrømme

### Psychrometric Processes of moist air



Figur 10 Blanding af to fugtige luftstrømme.

Figur 10 er et skærmbillede for beregning af blandingen af to fugtige luftstrømme.

Input til programmet er:

- Massestrømmen af de to luftstrømme
- Temperatur af de to luftstrømme
- Relativ fugtighed i de to luftstrømme

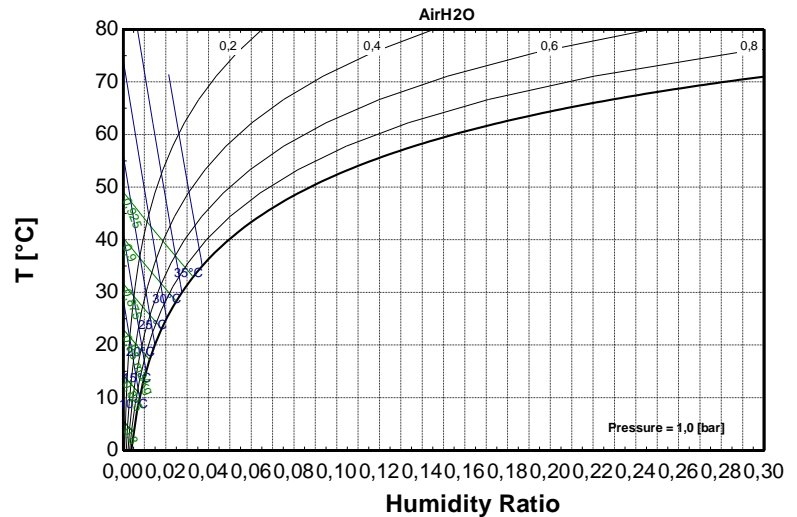
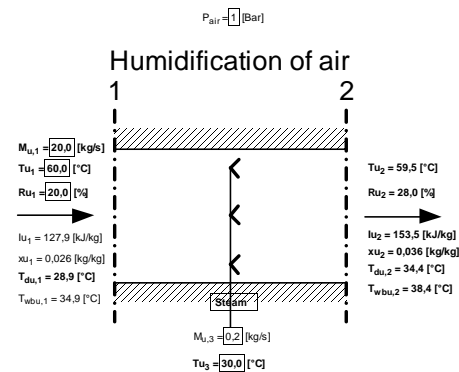
Programmet beregner selv de resterende tilstandsstørrelser af luften henholdsvis før og efter blandingen af de to luftstrømme.

## Befugtning af luft med damp eller vand

### Psychrometric Processes of moist air

#### Choice of Process

- ☐ Heating of moist air
- ☐ Cooling of moist air
- ☐ Mixing of two moist air streams
- ☒ Humidification of moist air



Figur 11 Befugtning af fugtig luft med damp eller vand.

Figur 11 et skærmbillede for befugtning af fugtig luft med damp eller vand

Input til programmet er:

- Massestrømmen af luft og damp/vand
- Temperatur af luft og damp/vand
- Relativ fugtighed i luften

Programmet beregner selv de resterende tilstandsstørrelser af luften henholdsvis før og efter befugtningen.



### 3.3 IX diagram for temperaturer over 100°C

#### Mollier IX-diagram

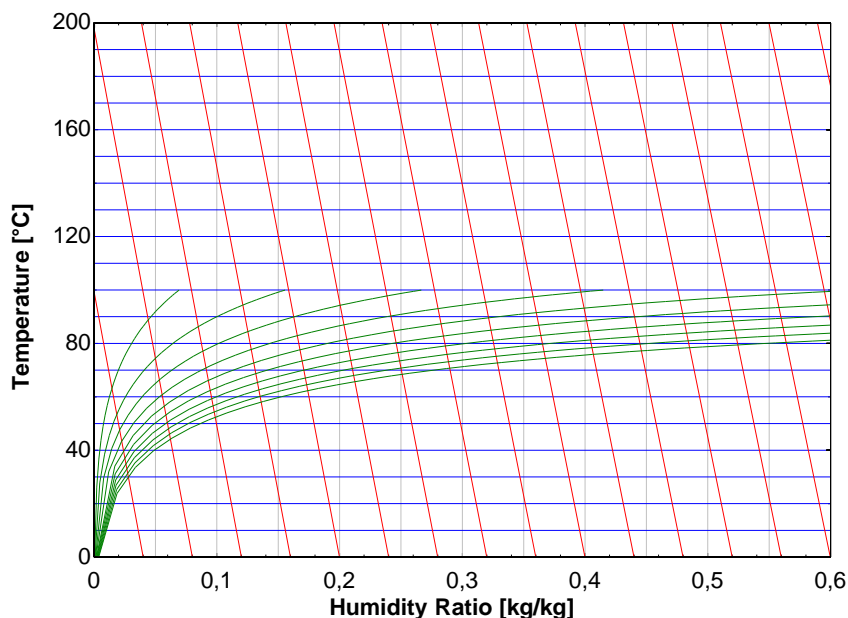
##### Inputs:

Pressure  $P = 1,013$  [bar]  
Maximum temperature on Y-axis  $T_{max} = 200$  [°C]  
Temperature interval  $dT = 10$  [°C]  
Maximum humidity ratio on x-axis  $x_{max} = 0,6$  [kg/kg]  
Humidity ratio interval  $dx = 0,05$  [kg/kg]  
Enthalpy interval  $dh = 100$  [kJ/kg]

##### Relative Humidity Lines

- ☒ RH 10%
- ☒ RH 20%
- ☒ RH 30%
- ☒ RH 40%
- ☒ RH 50%
- ☒ RH 60%
- ☒ RH 70%
- ☒ RH 80%
- ☒ RH 90%
- ☒ RH 100%

DTU, Department of Mechanical Engineering  
Powered by Engineering Equation Solver  
Made by Martin Ryh Kærn



Figur 12 Generering af IX diagram.

Figur 12 viser brugerfladen for programmet IX, der kan tegne IX diagrammer for temperaturer over 100°C.

Input til programmet er:

- Tryk
- Maksimal temperatur på y-aksen
- Temperaturinterval på y-aksen
- Maksimal fugtindhold på x-aksen
- Fugtindholdsinterval på x-aksen
- Enthalpi interval (Afstanden mellem isenthalperne i diagrammet)
- Afkrydsning af relativ fugtighed fra 10-100%.

De blå linjer i diagrammet viser isotermerne, de grønne linjer viser konstant relativ fugtighed og de røde linjer viser isenthalperne.

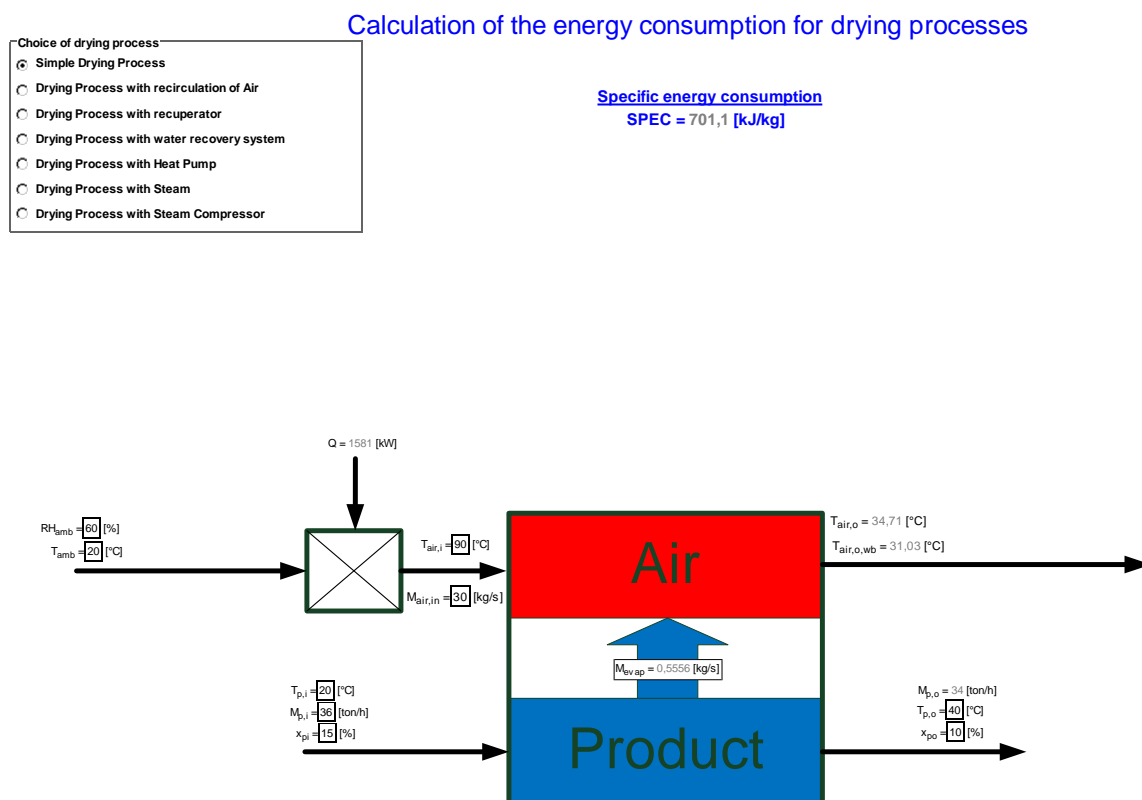
### 3.4 Beregning af energiforbruget for kontinuerlige tørreprocesser

Programmet kan beregne syv forskellige tørreprocesser:

1. Simpel tørreproces
2. Tørreproces med recirkulation af tørreluft
3. Tørreproces med luftforvarmer
4. Tørreproces med vandgenvindingssystem
5. Tørreproces med varmepumpe
6. Tørreproces med overheded vanddamp
7. Tørreproces med overheded vanddamp og vanddampskompressor

De syv tørreprocesser bliver gennemgået i de følgende afsnit.

#### 3.4.1 Ad 1) Simpel tørreproces



Figur 13 Simpel tørreproces fra "DryPack".

Figur 13 viser den tørreproces som man oftest vil møde i industrien, og hvor der kan opnås forbedringer på energieffektiviteten ved at anvende de andre tørreprocesser (tørreproces 2-7).

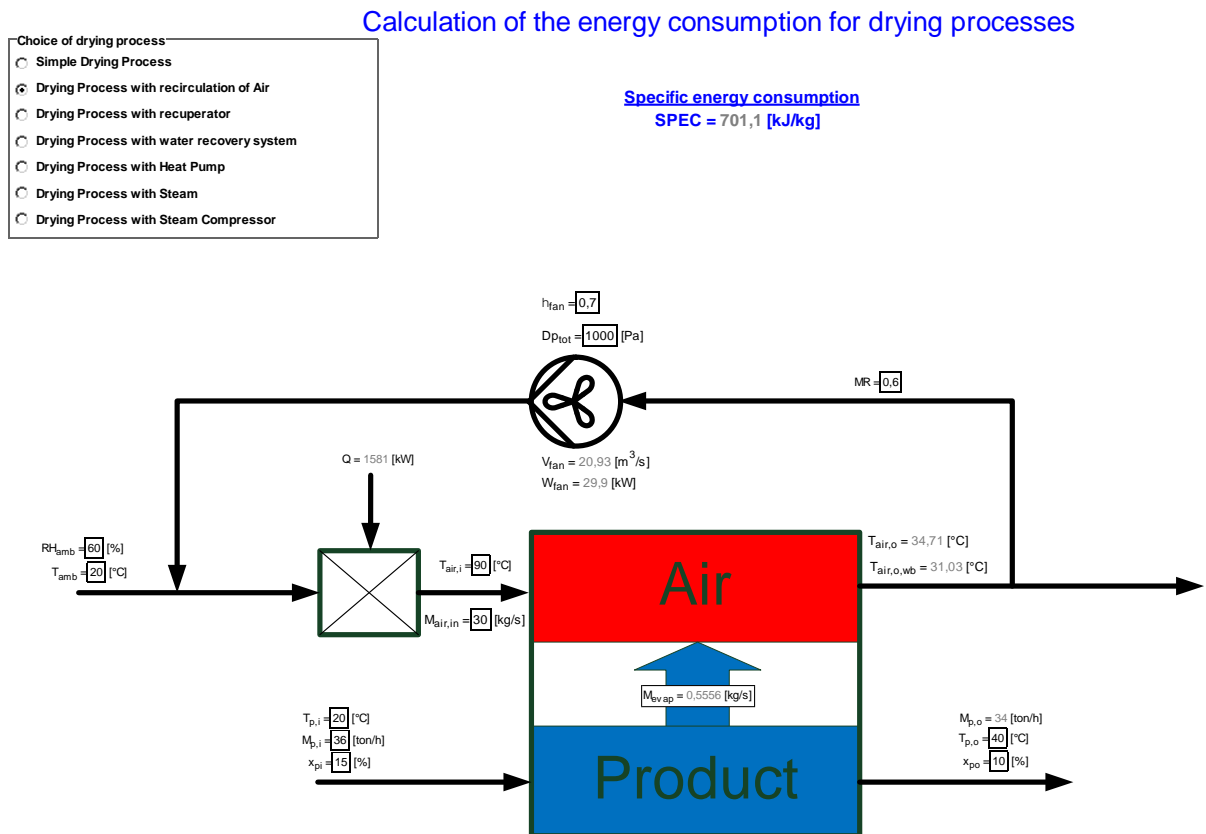
Input til programmet er, (start fra venstre i figur 13):

- Luftens temperatur og relative fugtighed ( $T_{amb}$ ,  $RH_{amb}$ )
- Massestrømmen og tilgangstemperaturen af tørreluft ( $M_{air,in}$ ,  $T_{air,in}$ )
- Produktets tilgangstemperatur, massestrøm og vandindhold ( $T_{pi}$ ,  $M_{pi}$ ,  $x_{pi}$ )
- Produktets afgangstemperatur og vandindhold ( $M_{po}$ ,  $x_{po}$ )

Output fra programmet er:

- Nødvendig varmeeffekt til opvarmning af tørreluft (Q)
- Lufttemperatur ved afgang, våd og tør ( $T_{air,o}$ ,  $T_{air,owb}$ )
- Fordampet vandmængde fra produktet ( $M_{evap}$ )
- Massestrømmen af produktet ud af tørreren ( $M_{po}$ )
- Specifikt energiforbrug (SPEC)

### 3.4.2 Ad 2) Tørreproces med recirkulation af tørreluft

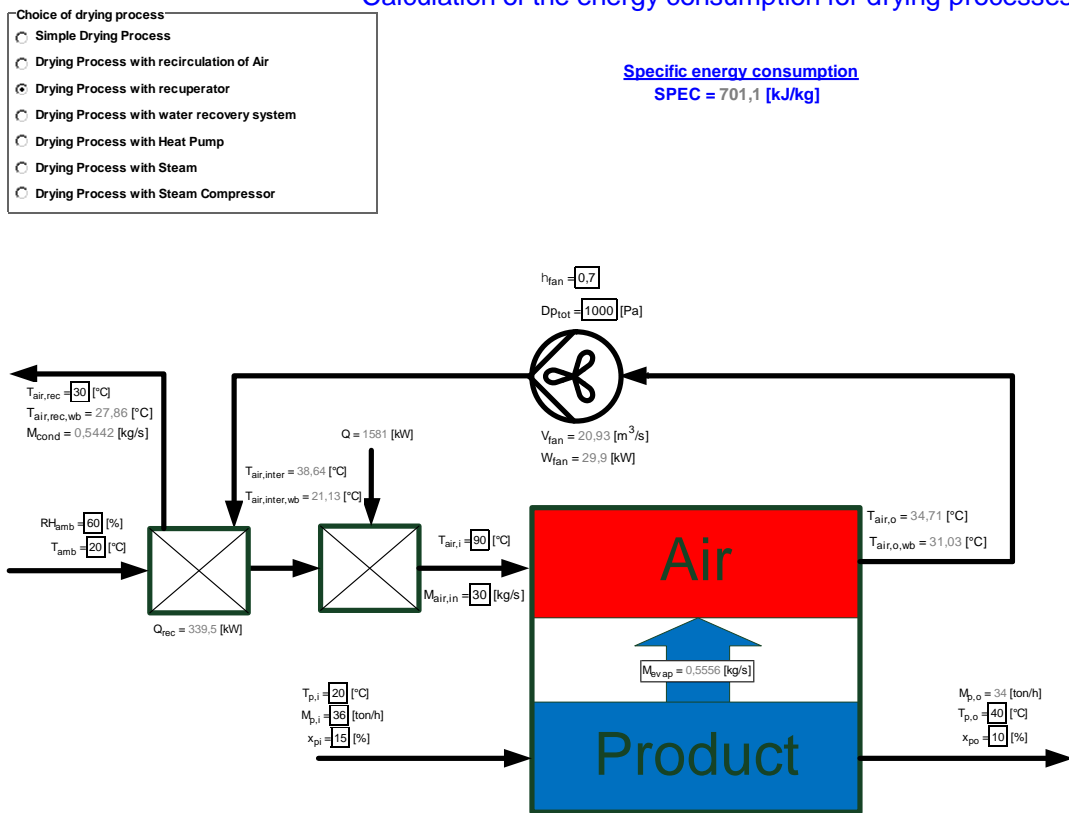


Figur 14 Tørreproces med recirkulation af tørreluft

Ved at recirkulere en delstrøm af tørreluft fra afgang af tørreren og blande den med tilgangsluft, kan der spares energi til opvarmningen, da udeluft opvarmes ved blandingen med afgangsluft, se figur 14. Ulempen ved dette system er, at tørreluft bliver fugtigere, hvilket kan have indflydelse på tørretiden.

### 3.4.3 Ad 3) Regenerativ opvarmning af indgangsluften med luftforvarmer

Calculation of the energy consumption for drying processes



Figur 15 Tørreproces med luftforvarmer.

Afkastluften anvendes til at forvarme indgangsluften via en rekuperator, se figur 15. På denne måde spares der energi til opvarmningen af luften. Beregningerne tager højde for udkondensering af vand i forvarmeren fra afkastluften.

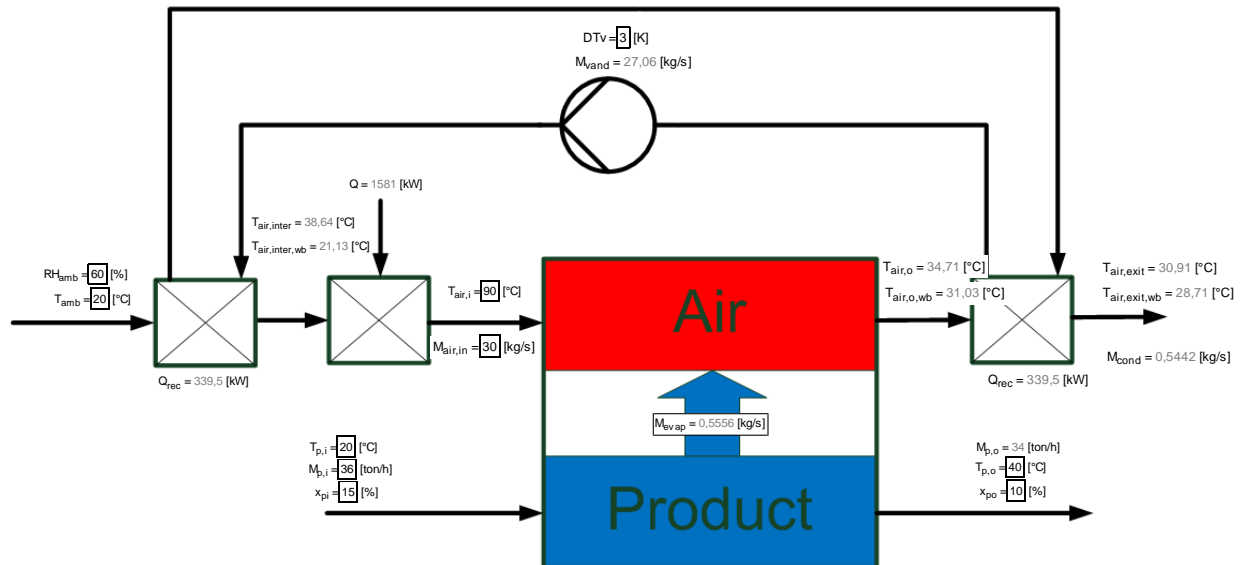
### 3.4.4 Ad 4) Tørreproces med vandgenvindingssystem

#### Calculation of the energy consumption for drying processes

- Choice of drying process
- ☐ Simple Drying Process
  - ☐ Drying Process with recirculation of Air
  - ☐ Drying Process with recuperator
  - ☒ Drying Process with water recovery system
  - ☐ Drying Process with Heat Pump
  - ☐ Drying Process with Steam
  - ☐ Drying Process with Steam Compressor

Specific energy consumption

SPEC = 701,1 [kJ/kg]

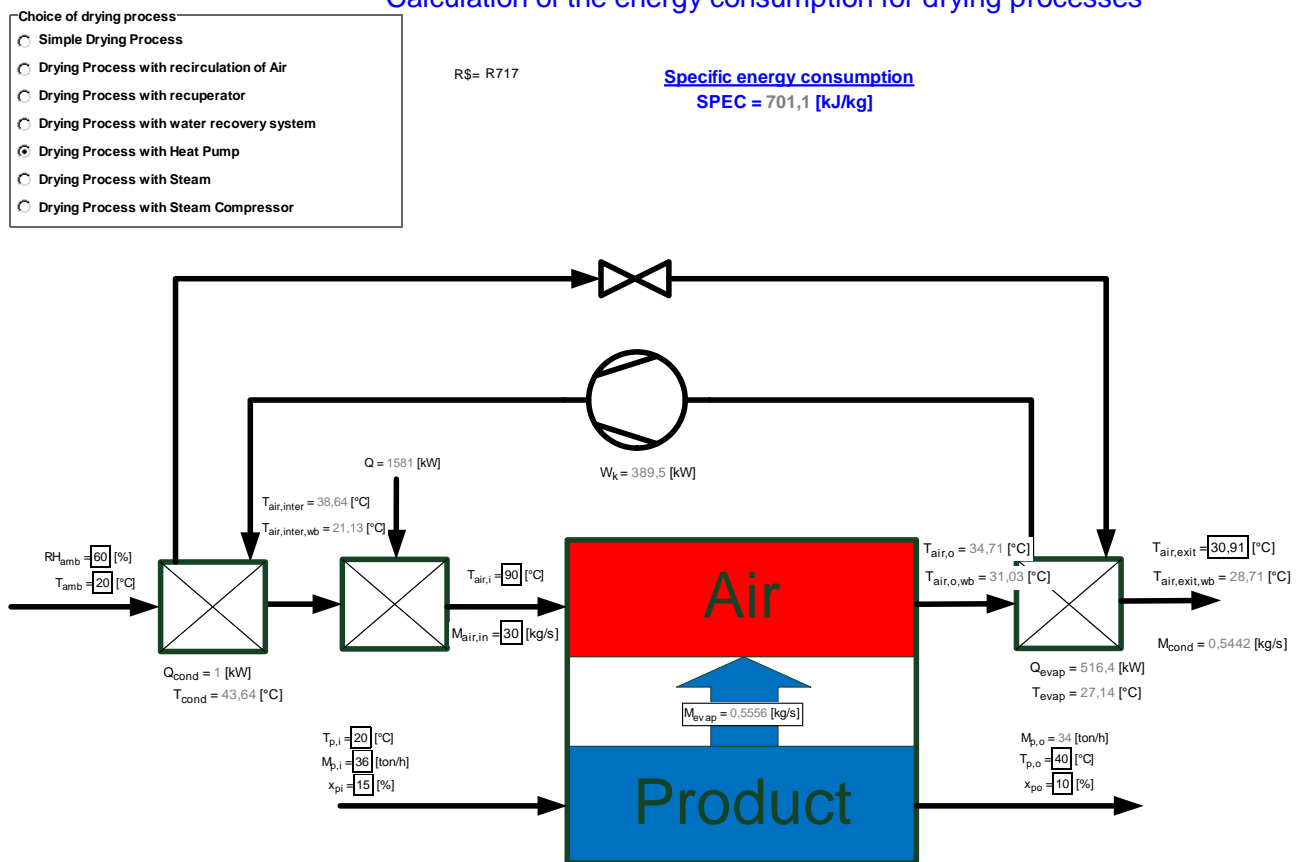


Figur 16 Tørreproces med vandgenvindingssystem.

I denne proces genvindes varmen i afkastluften i en vandkølet varmeveksler, se figur 16. Vandet opvarmes og anvendes til at forvarme indgangsluften. Denne proces vil især finde anvendelse, hvor der er stor afstand mellem afkastluften og indgangsluften. Det vil være lettere at trække vandrør end luftkanaler.

### 3.4.5 Ad 5) Tørreproces med varmepumpe

#### Calculation of the energy consumption for drying processes

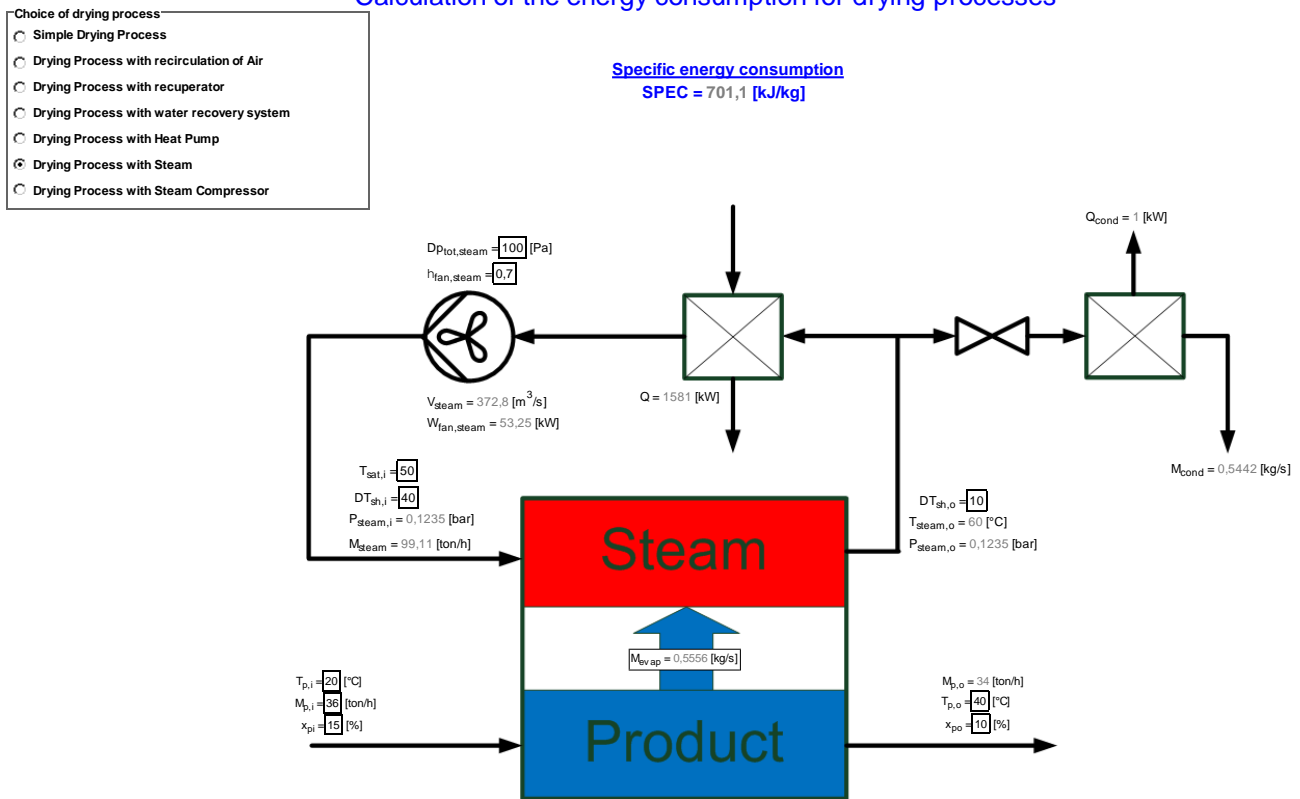


Figur 17 Tørreproces med varmepumpe.

Tørreprocessen med varmepumpe er vist i figur 17. Processen er næsten identisk med den foregående proces, men i dette tilfælde er der placeret en varmepumpe, som afkøler afgangsluften og overfører varmen til indgangsluften ved en højere temperatur. Kølemidlet i varmepumpekredsen er ammoniak.

### 3.4.6 Ad 5) Tørreproces med overheded vanddamp

Calculation of the energy consumption for drying processes



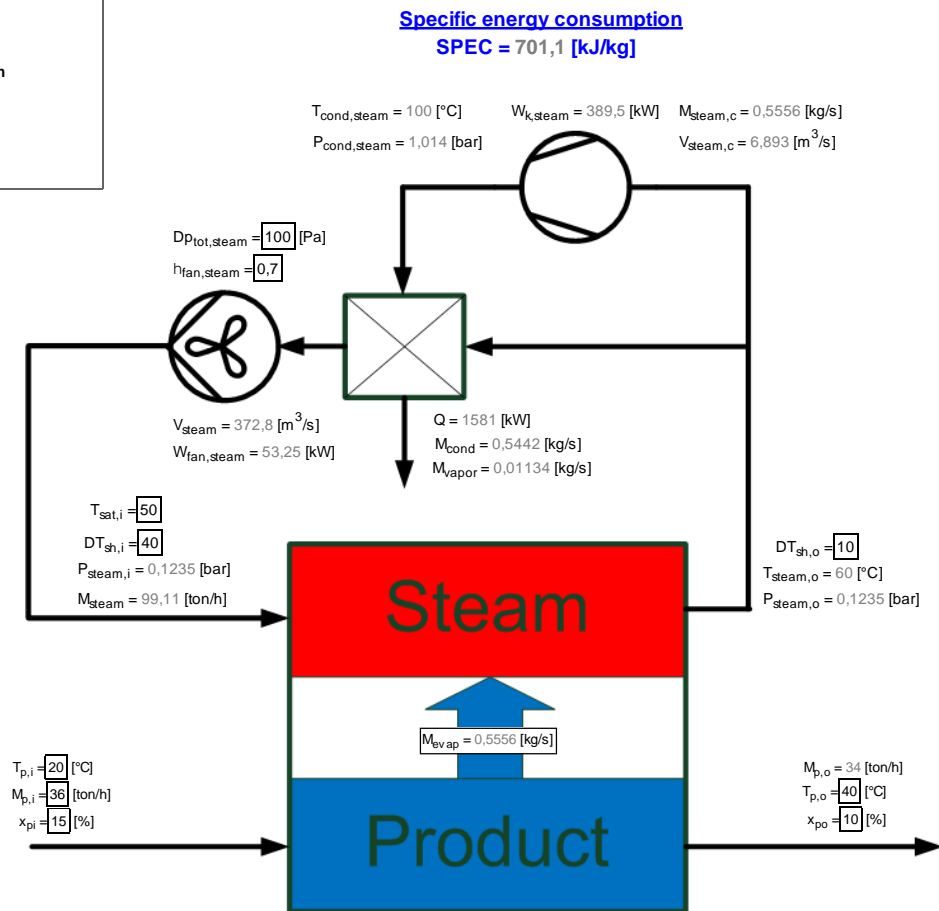
Figur 18 Tørreproces med overheded vanddamp.

Figur 18 viser en tørreproces med overheded vanddamp. Tørringen af produktet foregår med overheded vanddamp, der har en temperatur, som er højere en vanddampens mætningstemperatur. Processen er lukket og tørretemperaturen kan tilpasses ved at regulere trykket i den lukkede proces.

Sammenlignet med en lufttørreproces er det lettere at genvinde varmen i afkastet ved at kondensere vanddampen.

## Calculation of the energy consumption for drying processes

- Choice of drying process
- ☐ Simple Drying Process
  - ☐ Drying Process with recirculation of Air
  - ☐ Drying Process with recuperator
  - ☐ Drying Process with water recovery system
  - ☐ Drying Process with Heat Pump
  - ☐ Drying Process with Steam
  - ☒ Drying Process with Steam Compressor



Figur 19 Tørreproces med overheded vanddamp og dampkompressor

Figur 19 viser en af de mest energieffektive tørreprocesser. Processen er identisk med tørreprocessen med overheded vanddamp med undtagelse af varmen i afkastdampen, som bringes tilbage til tørreprocessen ved at anvende en vanddampkompressor. Vanddampkompressoren komprimerer afkastdampen op til et højere tryk og temperatur, hvor den kondenserer ved opvarmning af den cirkulerende damp.



### 3.5 Batchtørrer program

Figur 20 viser brugerfladen til batch beregningsprogrammet. Programmet er udformet med en god hjælpefunktion, der fint beskriver input og output.

Calculation of the energy consumption for batch dryer at atmospheric pressure

**Main inputs to model**

<b>Initial conditions</b>		<b>Surroundings</b>	
Solid temperature, $T_{s,0}$ [°C]	30	Temperature of surroundings, $T_{inf}$ [°C]	25
Solid moisture content, $X_0$ [kg/kg]	2.71	Relative humidity of surroundings, $\phi_{inf}$ [%]	50
<b>Integration</b>		<b>Auxiliary inputs</b>	
Required moisture content, $X_{stop}$ [kg/kg]	0.2	Blower efficiency, $\eta$ [-]	0.9
Integration stop time [s]	150000	Blower volume flow, $\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /s]	20
Time increment for integration table [s]	60	Exhaust factor (part of circulation), $F$ [-]	0.1

**Detailed inputs to model**

Geometry and Properties  
Blower, Piping and Control  
Drying modeling

Simulation and Help  
Calculate  
Help and Documentation

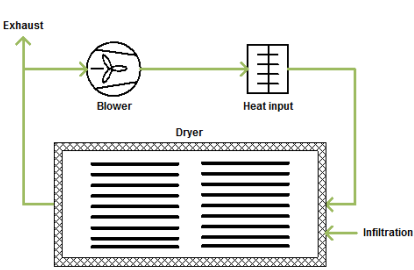
Results  
Drying plots  
I,x diagram

Save and load inputs  
Save Load

**Main model outputs**

<b>Main results</b>		<b>Total mass of solid and moisture flows</b>	
Drying time [s]	110438	Mass of solid, $M_S$ [kg]	6887
Final moisture content, $X$ [kg/kg]	0.1999	Mass of residual moisture, $M_{W,res}$ [kg]	1341
Heat consumption, $E_{heat}$ [kWh]	16117	Mass of evaporated water, $M_{W,evap}$ [kg]	16781
Blower power consumption, $W$ [kWh]	159.7	Moisture infiltration, $M_{W,infiltration}$ [kg]	1972
Total volume flow through blower, $V$ [m <sup>3</sup> ]	2.203E+06	Moisture exhaust, $M_{W,exhaust}$ [kg]	18752

Output file location for integral table (.csv format): [C:\IntegralTable.csv](#)



Figur 20 Brugerflade til batch tørreprogrammet.

I ovenstående brugerflade udgør input startværdierne for produktet inden tørringen, såsom temperatur, tørstofindholdet samt omgivelsernes temperatur og fugtighed. Det angives desuden ved hvilket tørstofindhold beregningen skal slutte. Ventilatoren specificeres ligeledes.

Nederst vises hovedresultaterne fra programmet, og her kan nævnes tørretiden, energiforbruget samt den fordampede mængde vand fra produktet under tørringen.

Til programmet skal der ligeledes laves mere detaljerede input, hvilket vælges med de forskellige knapper.

### 3.5.1 Geometri

For at kunne beregne hastigheden af tørreluft/dampen over produktet skal geometrien af produktet specificeres samt det areal af produktet, der er i kontakt med tørremediet. Dette gøres i brugerfladen, som er vist i figur 21.

Geometry & property inputs

Main

Choice of geometry mode  
☒ Skamol ☐ General

Note that only duct flow type is supported in the current version

Flow direction

**Wet solid geometry:**

Solid width, $W$ [m]	2.05
Solid thickness, $\delta$ [m]	0.03
Solid length, $L$ [m]	1.239
Rectangle width, $x_r$ [m]	0.025
Rectangle height, $y_r$ [m]	0.015
Number of plates per wagon, $n_p$ [-]	26
Number of rectangles per plate, $n_r$ [-]	27
Number of wagons, $n_w$ [-] (The wagons are aligned in two rows (series) in the flow direction)	15

**Wet solid properties:**

Density of solid (dry bulk), $\rho_{0s}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	225
Specific heat of solid (dry bulk), $c_{p,s}$ [J/(kg·K)]	840

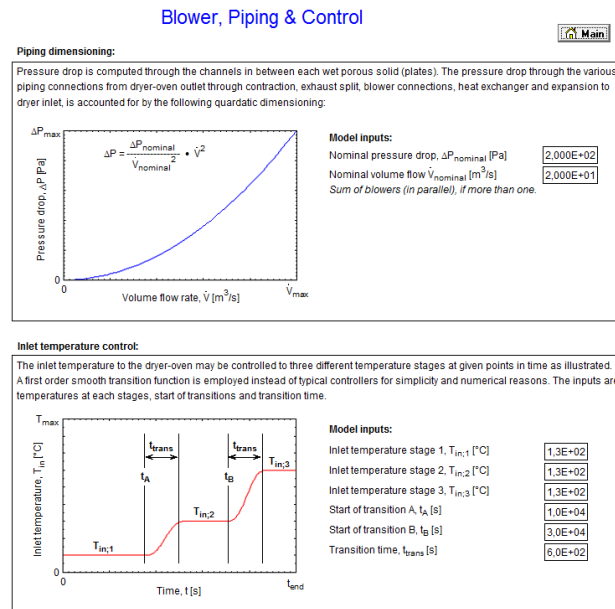
**Dryer geometry:**

Total air volume of dryer, $V$ [m <sup>3</sup> ]	80
--	----

Figur 21 Angivelse af geometrien for det tørrede produkt

### 3.5.2 Ventilator og temperatur styring

I programmet er det muligt at regne på tryktabet i systemet, se figur 22. Tryktabet i batchtørreeren skal kendes i et norm punkt, så trykfaldet ved et givent flow angives. Skaleringen til andre trykfald følger proportionalitetslovene.



Figur 22 Specifikation af temperaturstyring og tryktab.

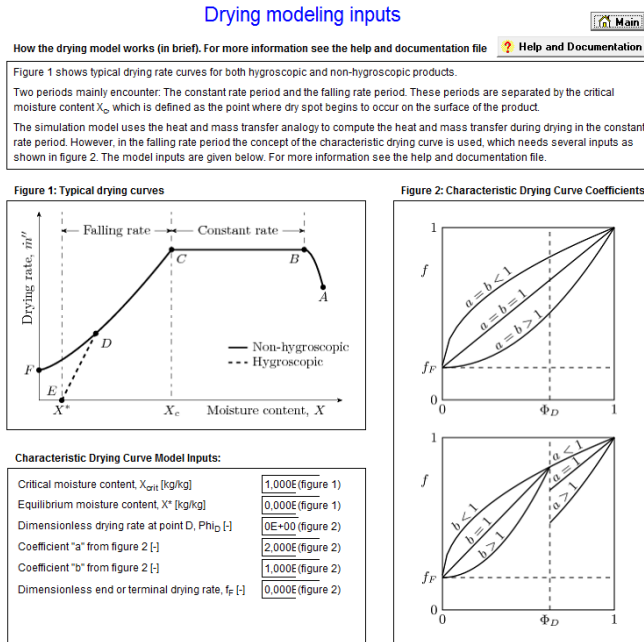
Der anvendes temperaturstyring for ikke at tørre produktet for hårdt, da der ellers kan opstå revner i det. Programmet giver derfor mulighed for at ændre setpunktet for temperaturen i løbet af tørreprocessen. I programmet specificeres ved hvilken temperatur tørningen skal foregå inden for et givent tidsrum, se figur 22.

For at kunne modellere tørreprocessen skal der være kendskab til seks dimensionsløse kendetal, som man kun kan få adgang til, hvis man har en tørrekurve for produktet, se figur 23.

De seks kendetal er:

Det kritiske fugtindhold	Xcrit (kan umiddelbart aflæses fra tørrekurven)
Ligevægtstørrekurven	Skal tages fra en sorptionsisoterm
PHId	Kan ses på tørrekurven
A	Kan ses på tørrekurven
B	Kan ses på tørrekurven
fF	Kan ses på tørrekurven

## Drying modeling inputs



Figur 23 Modellering af tørreprocessen.

I programmets hjælpefil er der angivet nogle værdier fra litteraturen på nogle produkter, men det tilrådes at kontakte personer, som kan fremskaffe kendetallene ved måling af tørrekurven.

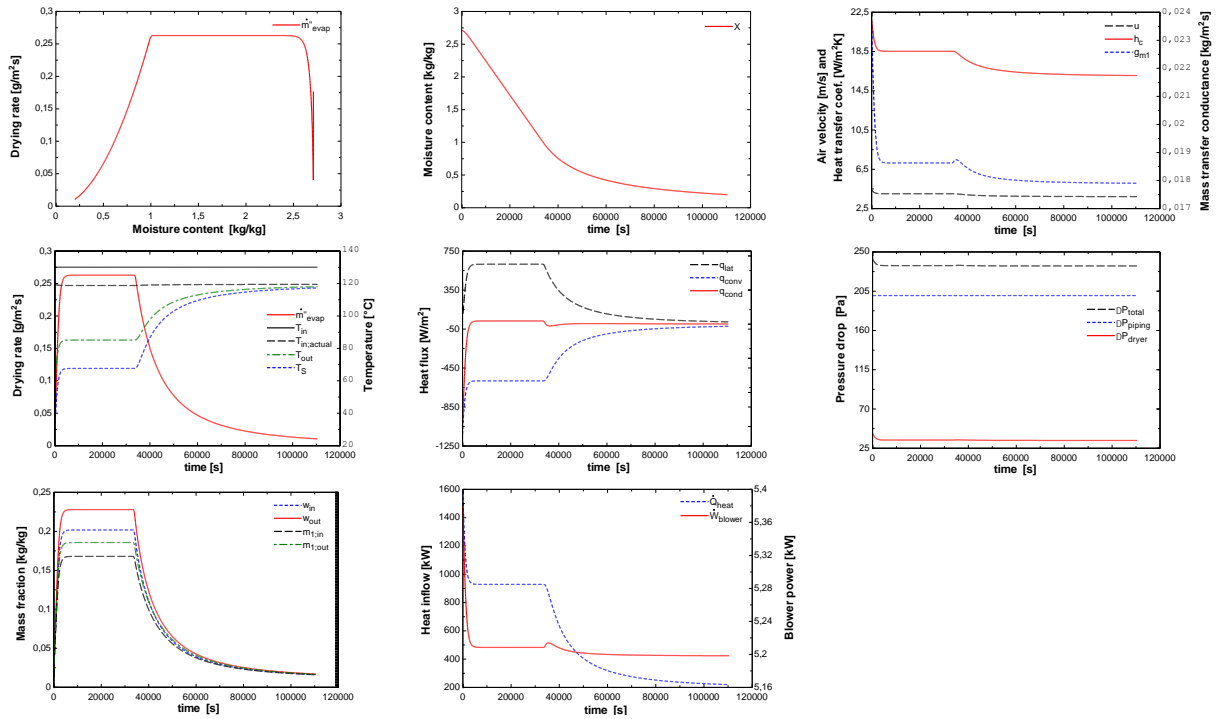
Programmet genererer mange diagrammer, se også figur 24:

- Tørrehastighedskurve
- Tørrekurve
- Lufthastighed/varmeovergangstal
- Varmefflux
- Trykfald
- Massestrømme i systemet
- Varmeininput

Desuden indtegnes temperaturer i systemet i IX-diagram, som vist i figur 24:

- Damptemperatur
- Temperatur før og efter dampvarmeveksleren

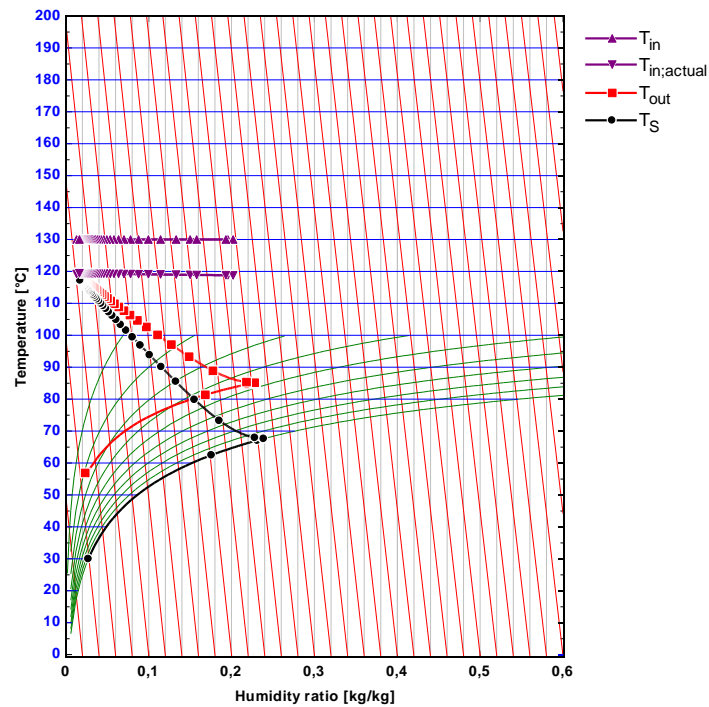
### Drying plots



Figur 24 Diagrammer fra programmet

### I,x diagram

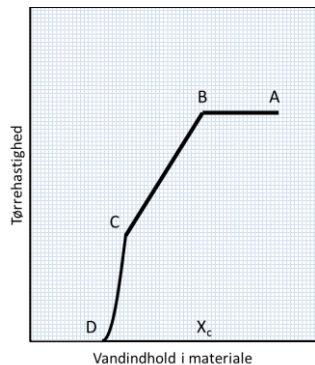
The I,x diagram shows the thermodynamic states of the air and water vapor mixture at the inlet ( $T_{in}, x_{in}$ ) and outlet ( $T_{out}, x_{out}$ ) of the dryer-oven, and in the immediate vicinity of the wet porous solid ( $T_s, x_s$ ). The immediate vicinity of the wet porous solid is saturated in the constant drying rate period. The state moves closely along the 100% relative humidity curve as the thermodynamic wet bulb temperature of the inlet and outlet states increases, i.e. the moisture content in the recirculation air increase due to water being evaporated from the wet porous solid. In the falling rate period the wet porous surface becomes dry and the immediate vicinity of the wet porous solid is no longer saturated. The state increases in temperature and decreases in humidity ratio and moves towards the inlet state.



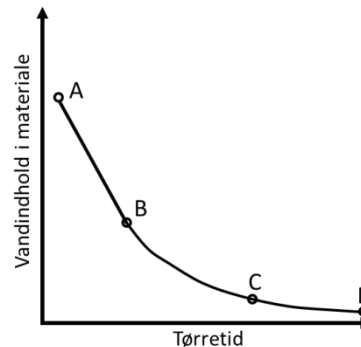
Figur 25 Temperaturer i systemet indtegnet i et IX diagram.

### 3.5.3 Beregning af tørretid

Ved tørring af et produkt (f.eks. flis) er der endnu en dimension, nemlig produktet, hvor vandindholdet ønskes nedbragt. Et typisk tørreforløb ser ud som vist i figur 26.



Figur 26 a) Vægtudvikling/vandindhold som funktion af tørretiden



Figur 27 b) Tørrehastighed som funktion af vandindholdet.

Grafen i figur 26 a viser tørrehastigheden op af y-aksen, hvilket vil sige, hvor mange kilo vand som fordamper per tidsenhed. Ud af x-aksen vises vandindholdet i produktet. Diagrammet i figur 26 b viser fugtigheden i produktet som funktion af tiden (kurven i figur 26a er afledt af kurven i figur 26b). Hvis det antages, at produktet indeholder frit vand, vil tørringen begynde ved A, hvor materialet har et højt vandindhold og forløber mod B, C og D. I begyndelsen er vandfordampningen høj og konstant. Dette skyldes, at der er frit vand på overfladen af produktet (A-B). Denne type af vand kan principielt rystes af produktet.

Hastigheden, hvormed dette vand forsvinder, er afhængig af overfladens størrelse, varmeovergangstallet, temperaturen og vandindhold i tørreluft. Efter et stykke tid er det kritiske vandindhold i produktet nået ( $X_c$ ), og der er ikke mere frit vand tilgængeligt på overfladen. I det efterfølgende tørreforløb (B-C) er tørringen begrænset af, hvor hurtigt vandet diffunderer til overfladen. For at vandet kan fjernes fra produktet kræves det, at vandet bevæger sig fra centrum mod overfladen af produktet. Denne diffusionsproces er blandt andet afhængig af produkttemperaturen og materialets massefylde samt hvor tørt produktet er på overfladen. I den diffusionsbetingede tørreperiode er tørrehastigheden konstant aftagende. I den sidste tørreperiode (C-D) fjernes det bundne vand, hvilket kan være vand, som findes imellem materialets salte eller bag en cellemembran i et plantemateriale. Der findes ikke nogen entydig forklaring på, hvad der sker i denne tørreperiode, men tørrehastigheden aftager ikke længere lineært som funktion af vandindholdet.

I en konkret tørreproces kan en eller flere af de bestående tørreperioder være fraværende lige som længden/fordelingen af de enkelt forløb kan være meget forskellig. Men generelt kan man sige, at så længe der er frit vand på overfladen, kan det være en fordel at have en relativ høj temperatur, mens man i den diffusionsbegrænsede periode er mere afhængig af, at vandet bevæger sig mod overfladen. En høj temperatur kan her gøre skade, da overfladetemperaturen nemt kan stige hurtigt. Hastigheden er også afhængig af temperatur og relativ fugtighed, men i mindre grad. Der er talrige eksempler på, at der benyttes en for høj temperatur i slutningen af tørreprocessen, hvorved produktet tørrer i skallen og efterlader en hård ugennemtrængelig skal, hvor vandet ikke har nemt ved at passere, periode (C-D).

For at kunne beregne tørretidens ændring ved at ændre på proceskonditionerne (temperatur, luftflow, fugtighed) skal man have kendskab til produktets start og slut vandindhold, samt kendskab til om vandindholdet ligger over eller under produktets kritiske vandindhold.

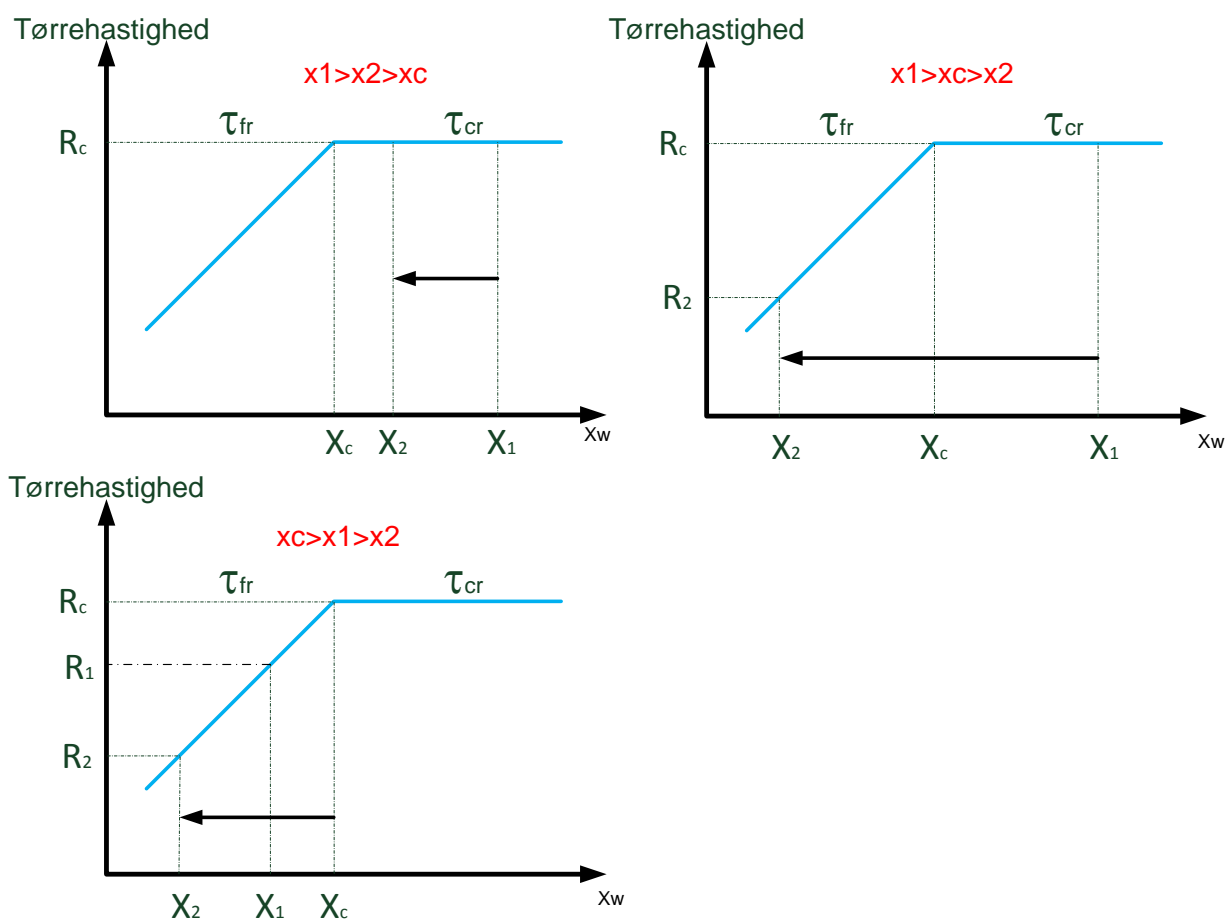
Ved hjælp af følgende to ligninger kan man beregne tørretiden for konstant og faldende tørrehastighed:

$$\tau_{CR} = \frac{M_d}{A \cdot R_c} (x_1 - x_2)$$

$$\tau_{FR} = \frac{M_d \cdot (x_1 - x_2)}{A \cdot (R_1 - R_2)} \cdot \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Den totale tørretid bliver:

$$\tau_{total} = \tau_{CR} + \tau_{FR}$$



Figur 28 Inndeling af tørreforløb for tilfælde a, b og c.

Tørretiden for de tre tilfælde vist i figur 27 bestemmes på følgende måde:

a) *For tilfældet  $x_1 > x_2 > x_c$*

$$\tau_{CR} = \frac{M_d}{A \cdot R_c} (x_1 - x_2)$$

$$\tau_{FR} = 0$$

$$\tau_{total} = \tau_{CR} + \tau_{FR}$$

b) *For tilfældet  $x_1 > x_c > x_2$*

$$\tau_{CR} = \frac{M_d}{A \cdot R_c} (x_1 - x_c)$$

$$\tau_{FR} = \frac{M_d \cdot (x_c - x_2)}{A \cdot (R_c - R_2)} \cdot LN \left( \frac{R_c}{R_2} \right)$$

$$\tau_{total} = \tau_{CR} + \tau_{FR}$$

c) *For tilfældet  $x_c > x_1 > x_2$*

$$\tau_{CR} = 0$$

$$\tau_{FR} = \frac{M_d \cdot (x_1 - x_2)}{A \cdot (R_1 - R_2)} \cdot LN \left( \frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$\tau_{total} = \tau_{CR} + \tau_{FR}$$

Ovenstående ligninger er implementeret i beregningsprogrammet DryingTime, hvor det er muligt at beregne den relative ændring af tørretiden ved ændring af procesparametrene.

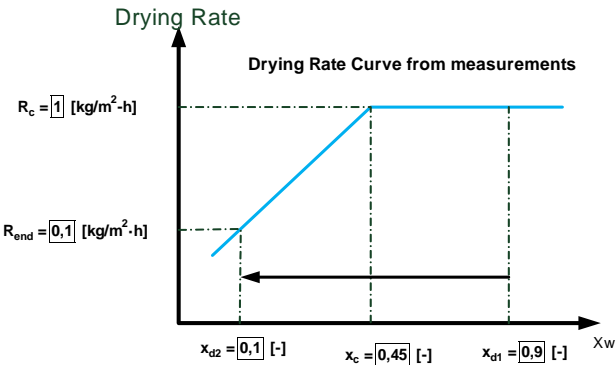
For at kunne anvende programmet skal man have en tørrecurve for produktet, som skal tørres, samt vide under hvilke procesparametre produktet er tørret. Programmet kan derved estimere, hvilken indflydelse ændringer i procesparametrene vil have på tørretiden. Dette beregnes som en relativ ændring i forhold til den oprindelige tørring, hvor der også eksisterer en tørrecurve, se figur 28.



Drying parameters influence on drying time

Initial conditions

Temperature	$T_{air} = 100$ [°C]
Wet bulb temperature	$T_{wb} = 76$ [°C]
Produktflow	$M_{pi} = 25$ [kg/h]
Moisture content start	$x_{start} = 0,8$ [-]
Moisture content send	$x_{end} = 0,2$ [-]



New Process Conditions

Temperature	$T_{air,new} = 105$ [°C]
Wet bulb temperature	$T_{wb,new} = 76$ [°C]
Produktflow	$M_{pi,new} = 28$ [kg/h]
Moisture content start	$x_{start,new} = 0,8$ [-]
Moisture content send	$x_{end,new} = 0,2$ [-]
Change in Air flow (-100 < $V_{air}$ < 100) %	$AirInc = 0$ [%]
Change in area of product (-100 < $A_{prod}$ < 100) %	$Arealnc = 0$ [%]

The drying time is decreased with 5,517 [%]

Figur 29 Beregningsprogram til bestemmelse af ændring af tørretid med nye procesparametre.

Tørrekurven tilnærmes med to rette linjer, der repræsenterer tørreperioden med konstant tørrehastighed og faldende tørrehastighed.

Først indtastes procesparametre fra referencemålingen og dernæst kan de nye procesparametre indtastes, hvorved ændringen i tørretiden beregnes.

## 4 Cases – praktisk anvendelse af ”DryPack”

I dette afsnit demonstreres anvendelsen af ”DryPack” programmet i fire forskellige cases.

I projektet deltog tre slutbruger af tørreanlæg:

1. Arkil, tørring af asfalt
2. Skamol, tørring af letklinker
3. Vestjyllands Andel, tørring af korn (der regnes på to korntørrer)

Der er udført feltmålinger på disse tørreanlæg og ud fra disse målinger er energiforbruget beregnet. ”DryPack” programmet er herefter anvendt til at beregne, hvilken energibesparelse der kan opnås.

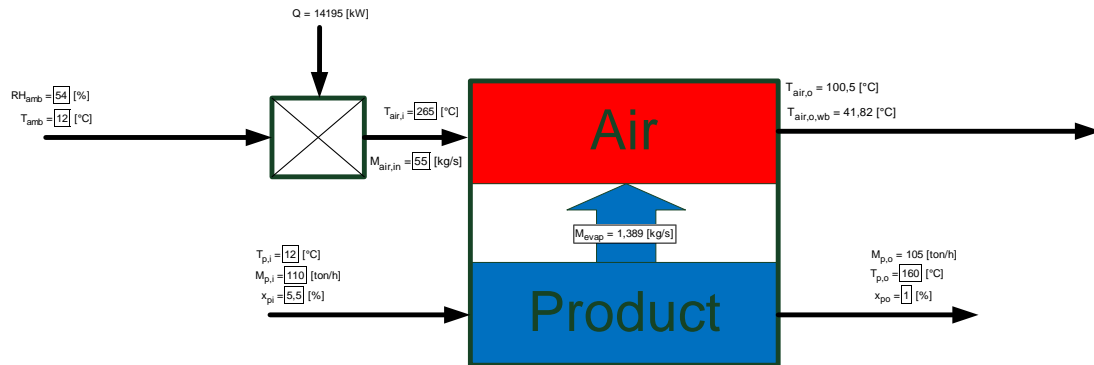
### 4.1 Case 1 Arkil, asfalttørrer

Systemet koncentrerer sig om en tromletørrer, hvor det våde grusmateriale bevæger sig i modstrøm med opvarmet luft, hvorved det tørres. Efter tørring ledes produktet over i et blandetårn, hvor det opblandes med andre elementer og bliver til asfalt, se figur 29. Den tilførte effekt til tørreprocessen styres efter at slutproduktet skal have en temperatur omkring 160-180°C.



Figur 30 Billede af Arkil asfalt fabrik

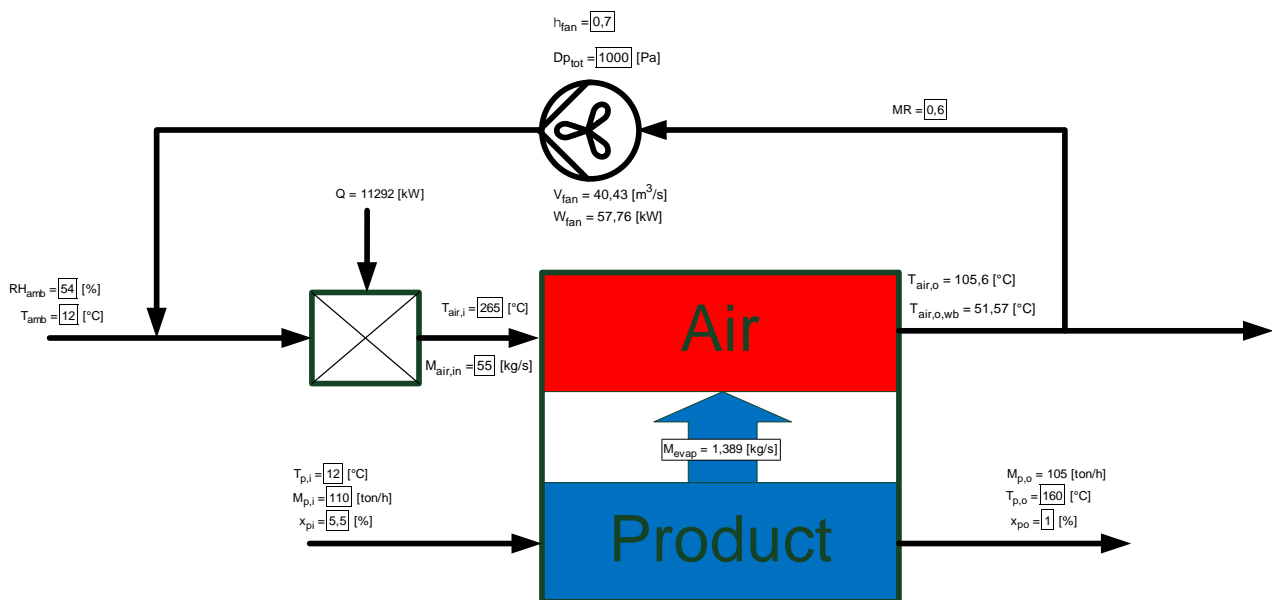
Figur 30 viser, at energiforbruget hos Arkil er beregnet til **14,2 MW**.



Figur 31 Varmebalance for tørreren hos Arkil.

#### 4.1.1 Forslag til energioptimering hos Arkil

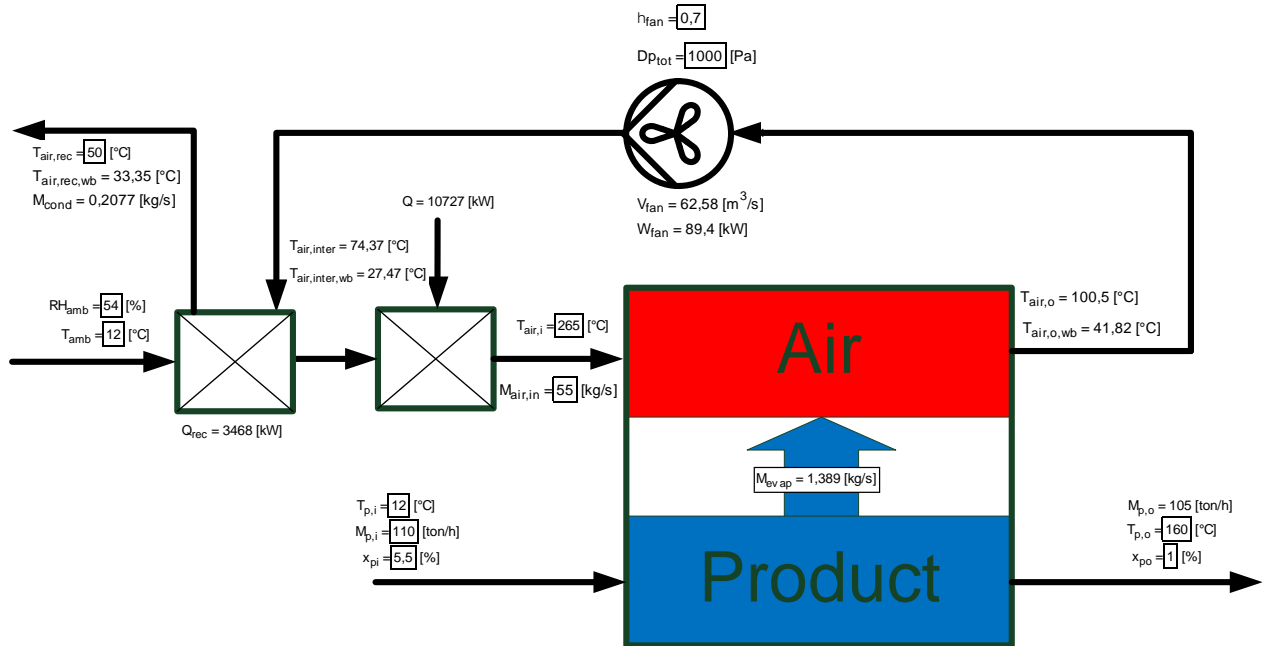
##### Recirkulation af afkastluften.



Figur 32 Arkil tørreren med recirkulation af tørreren.

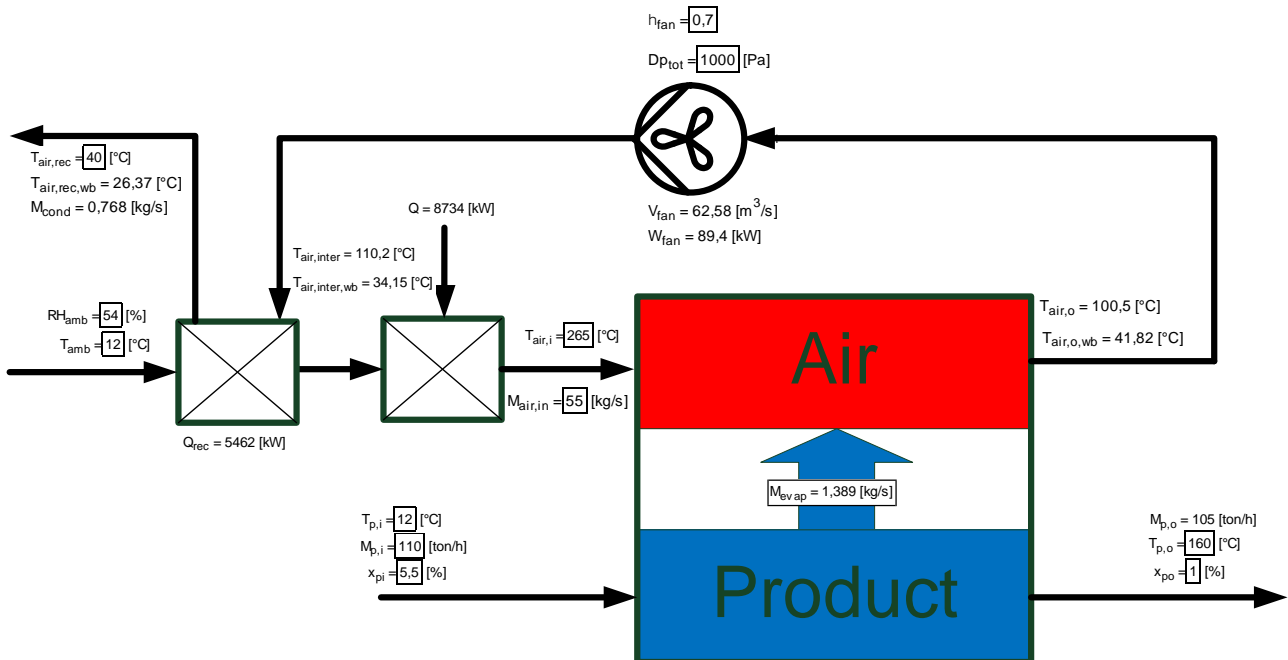
Ved at recirkulere afkastluften og blande den med udeluften, falde energiforbruget til **11,3 MW**, hvilket svarer til en energireduktion på **20%**, se figur 31.

### Varmeveksling mellem afkastluft og tilgangsluft.



Figur 33 Varmeveksling mellem afkastluft og tilgangsluft.

Ved at recirkulere afkastluften og blande den med udeluften, falde energiforbruget til **10,7 MW**, hvilket svarer til en energireduktion på **24,5%**. Afkastluften køles til 50°C, se figur 32.

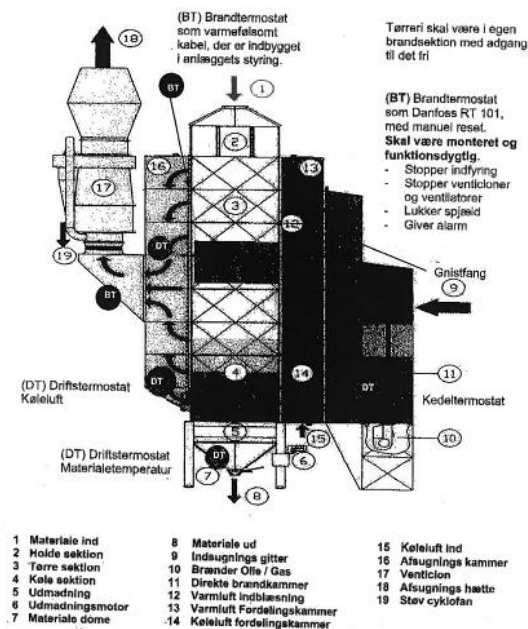


Figur 34 Varmeveksling mellem afkastluft og tilgangsluft

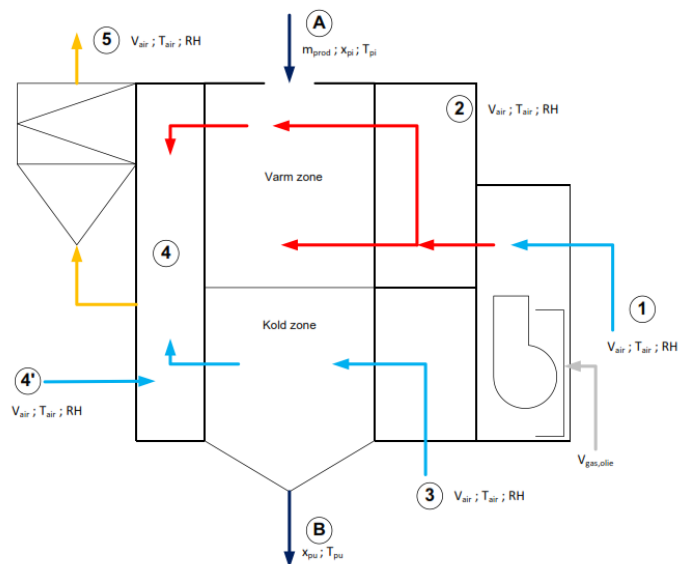
Ved at recirkulere afkastluften og blande den med udeluften, falde energiforbruget til **8,7 MW**, hvilket svarer til en energireduktion på **38%**. Afkastluften køles til 40°C, se figur 33.

Fordelen ved at anvende en varmeveksling fremfor at blande to luftstrømme er, at tørretiden vil være upåvirket, da proceskonditioner ind til tørreren er de samme.

## 4.2 Case 2 -Vestjyllands Andel, korntørrer



Figur 35 Korntørrer anvendt af Vestjyllands Andel



Figur 36 Principskitse af korntørrer hos Vestjyllands Andel.

Figur 34 og 35 viser opbygningen af korntørrerene hos Vestjyllands Andel i henholdsvis Borris og Vildbjerg. Luften kommer ind i tørreren ved pkt. 1 og varmes op af en gasbrænder, hvorved den når pkt. 2. Ved pkt. 2 fordeles luften ind i tørrrens varmesektion. Det våde korn strømmer ind fra oven i tørreren ved pkt. A, hvor massestrømmen, temperaturen og fugtindholdet måles. Kornet falder igennem tørreren og ved pkt. 3 bliver det kølet af udeluft. Ved pkt. B, udgangen af tørreren, måles kornets fugtindhold og temperatur igen. Luften fra varmesektionen blandes med luften fra

kølesektionen ved pkt. 4 og sendes gennem en cyklon for at separerer støv fra afgangsluften. Korntørring er meget sæsonbetonet, og al korntørring foregår samtidig med høsten i august og september. Der er derfor heller ikke det store fokus på energiforbruget, da anvendelsestiden er meget kort, men særdeles intens.

#### 4.2.1 Forslag til energioptimering hos Vestjyllands Andel

Der er udført målinger på korntørrere i henholdsvis Vildbjerg og Borris

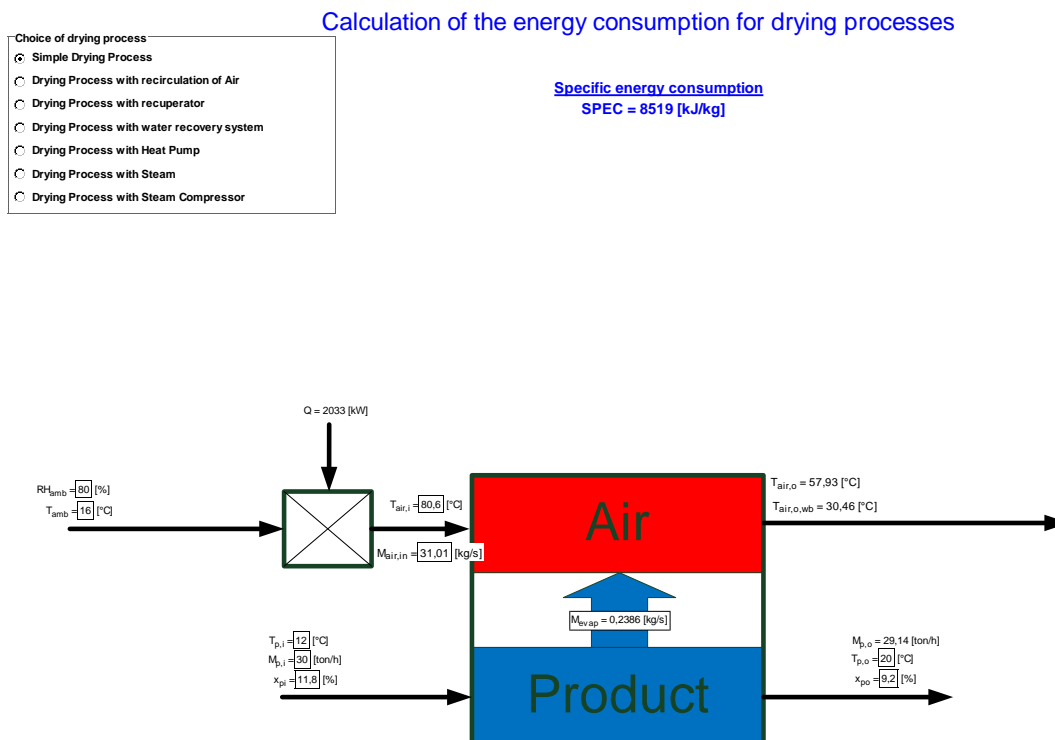
##### Vildbjerg:

De to skemaer refererer til målepunkterne i figur 35.

Luft						
Målepkt		1	2	3	4'	5
T	[°C]	16,1	78,5	16,1	16,1	28,1
RH	[%]	80,6		80,6	80,6	69,6

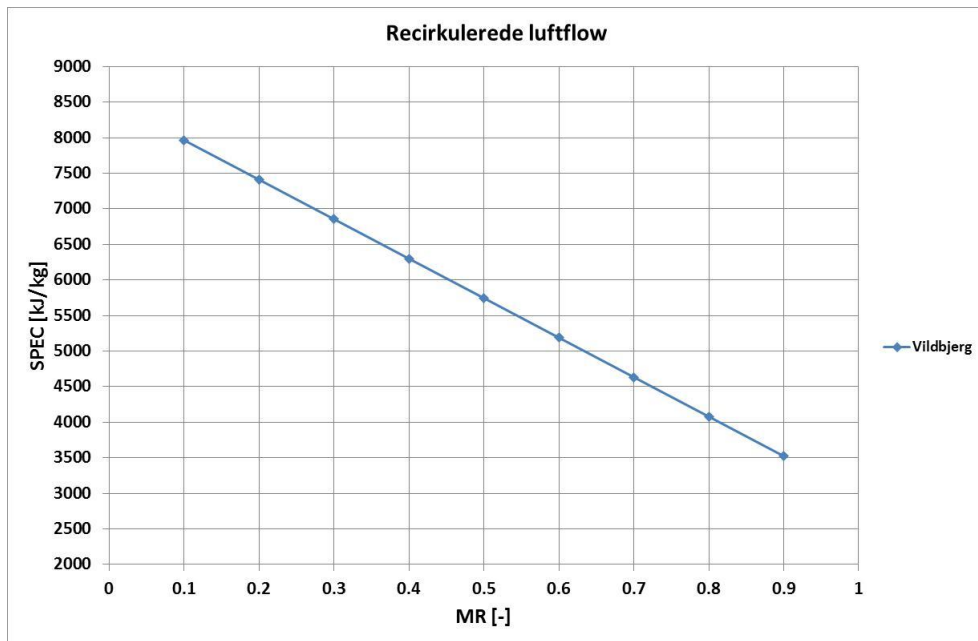
Produkt		A	B
m	[kg/s]	8,333	
x_p	[%]	0,148/0,118	0,123/0,092

Ovenstående målinger svarer til en vandfordampning på 828 kg/h og et specifikt energiforbrug på SPEC=8520kJ/kg beregnet i ”DryPack”, se figur 36.



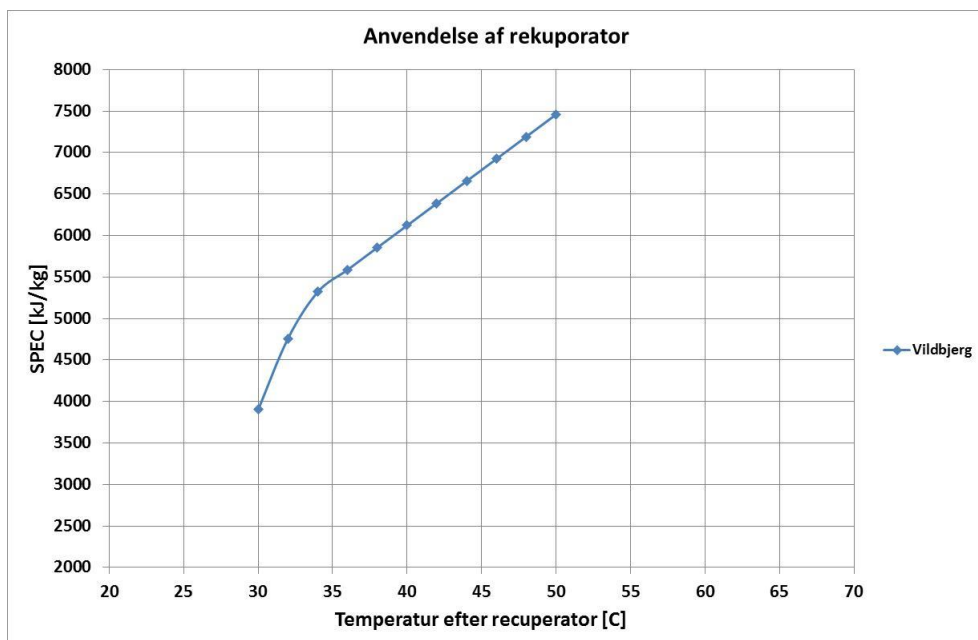
Figur 37 Beregning af energiforbrug Ved hjælp af ”DryPack”.

Ved at recirkulere luften kan der opnå betydelige energibesparelser, hvilket fremgår af figur 37. Her ses det, at energiforbruget falder til 3500 kJ/kg ved at recirkulere 90% af luften. Ulempen ved at recirkulere luften er, at indgangsluften bliver vådere og øger dermed tørretiden.



Figur 38 Specifikke energiforbrugs afhængighed af det recirkulerede luftflow.

Ved at anvende en rekuperator ændres tørretiden ikke, men det er alligevel muligt at opnå energibesparelser. Figur 38 viser, at energiforbruget falder ved at afkøle afkastluften så meget som muligt.



Figur 39 Energibesparelse ved anvendelse af en rekuperator, der nedkøler afkastluften og opvarmer tilgangsluften

### Borris:

De to skemaer refererer til målepunkterne i figur 35.

Luft					
Målepkt		1	2	3	5
T	[°C]	16,3	100	17	32,2
RH	[%]	63,4		61,8	68,6
Produkt		A	B		
m	[kg/s]	6,08			
x_p	[%]	19,4	15,5		

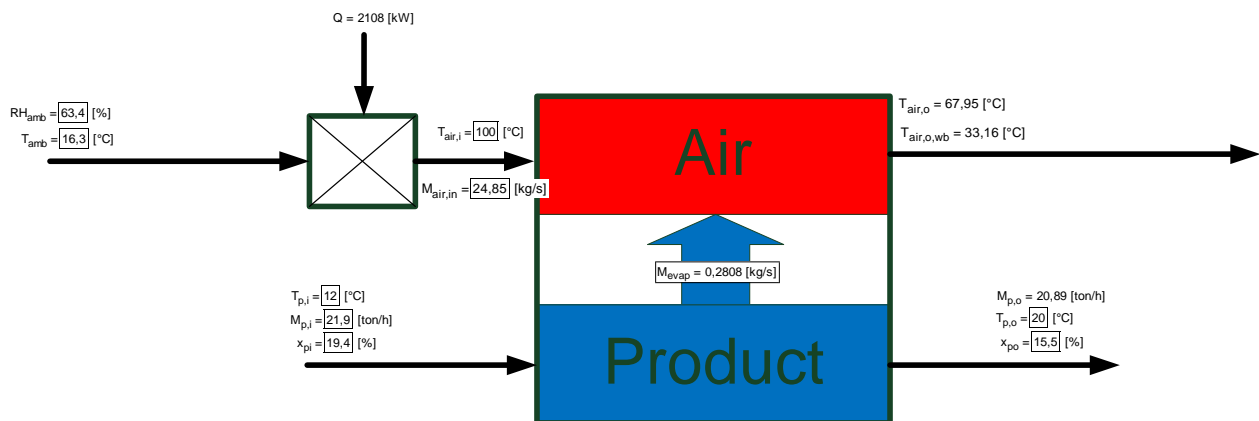
Ovenstående målinger svarer til en vandfordampning på 1008 kg/h og et specifikt energiforbrug på SPEC= 7500 kJ/kg, se figur 39.

### Calculation of the energy consumption for drying processes

Choice of drying process

- ☒ Simple Drying Process
- ☐ Drying Process with recirculation of Air
- ☐ Drying Process with recuperator
- ☐ Drying Process with water recovery system
- ☐ Drying Process with Heat Pump
- ☐ Drying Process with Steam
- ☐ Drying Process with Steam Compressor

Specific energy consumption  
SPEC = 7509 [kJ/kg]

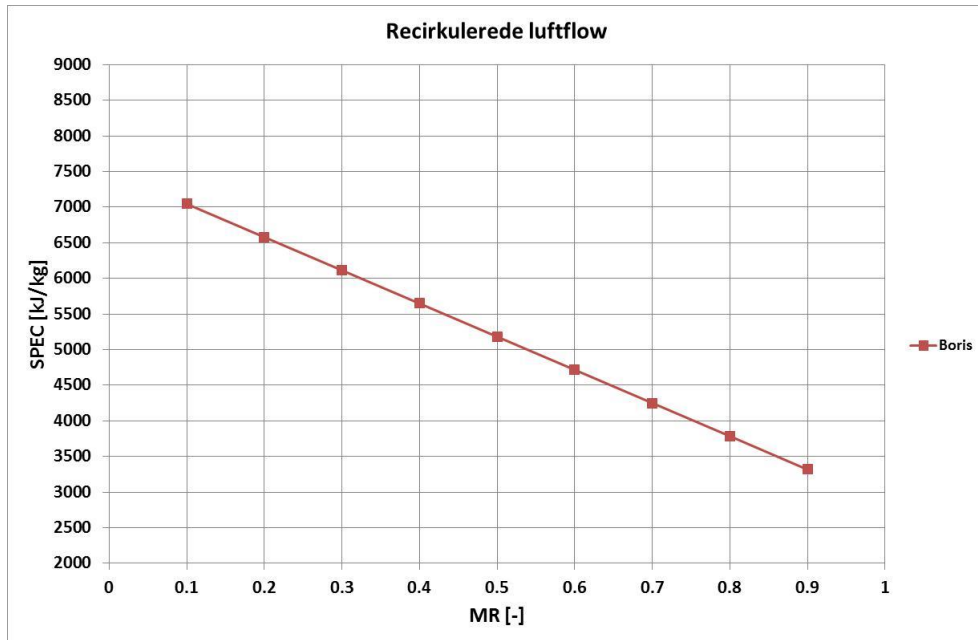


Figur 40 Beregning af energibesparelse med "DryPack"

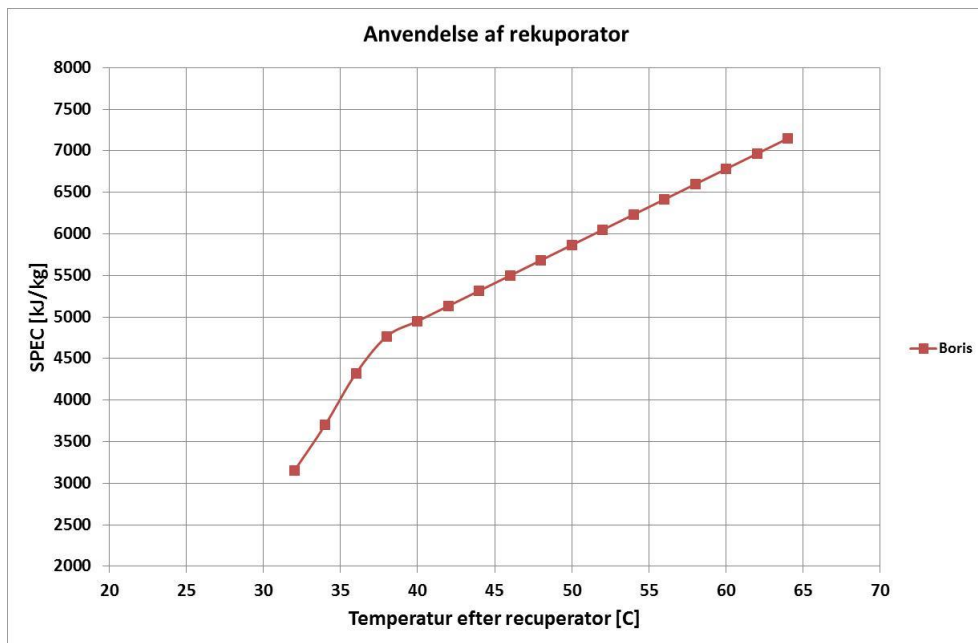


Energibesparelser beregnet med DryPack:

Ved at recirkulere luften kan der opnås betydelige energibesparelser, hvilket fremgår af figur 40. Her ses det, at energiforbruget falder til 3300 kJ/kg ved at recirkulere 90% af luften. Ulempen ved at recirkulere luften er, at indgangsluften bliver vådere og øger dermed tørretiden.



Figur 41 Energiforbruget ved at recirkulere luften



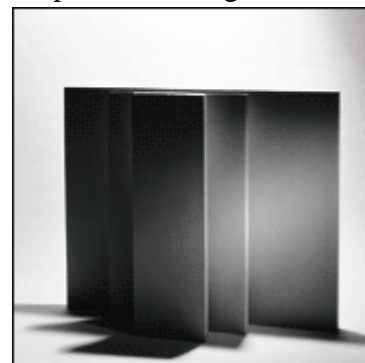
Figur 42 Energiforbruget ved anvendelse af rekuperator

Ved at anvende en rekuperator ændres tørretiden ikke, men det er alligevel muligt at opnå energibesparelser. Figur 41 viser, at energiforbruget falder ved at afkøle afkastluften så meget som muligt.

### 4.3 Case 3 – Skamol, batch tørrer

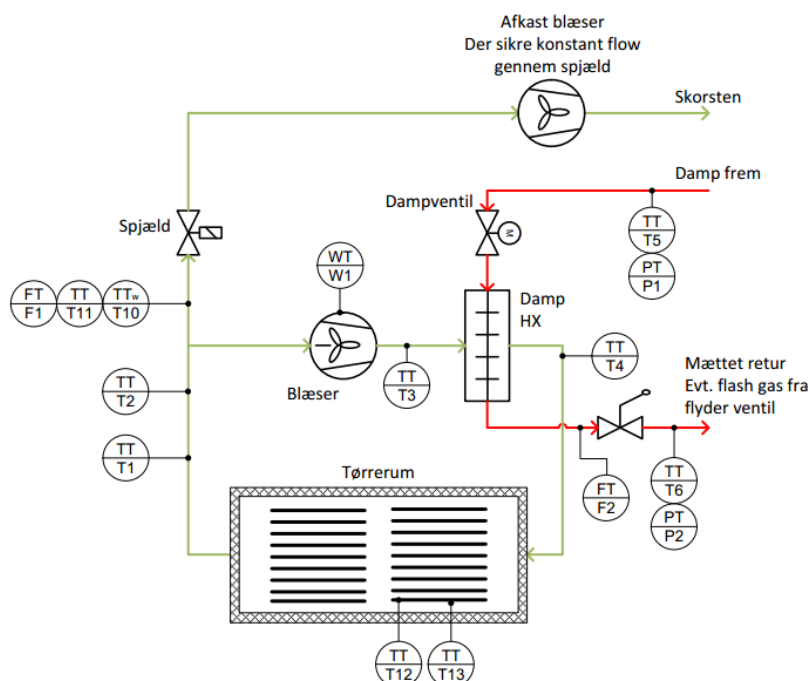
En batch proces er en proces, som foregår portionsvis. Produktionsmidlerne får tilført et vist input (en batch eller en charge) enten på én gang eller i løbet af en vis tid. Når processen er gennemført, vender apparaturet tilbage til udgangspositionen, og en ny batchproces kan begynde. Batchprocesser er modsætningen til kontinuerlige processer, hvor råvarer og produkter ledes til og fra i stadige strømme.

I projektet er der lavet et beregningsværktøj, der kan beregne energiforbruget for en batch tørrer. Værktøjet tager udgangspunkt i tørreren hos Skamol A/S, hvor der tørres højtemperatur isoleringsmateriale, se figur 42.



Figur 43 Letklinker

Figur 43 viser et flowdiagram over Skamol batch tørreren. Produktet, der tørres er letklinker.



TT = Temperature transmitter  
TT<sub>w</sub> = Temperature transmitter (wet bulb)  
PT = Pressure transmitter  
FT = Flow transmitter  
WT = Work (Watt) transmitter

Figur 44 Flowdiagram for Skamol batch tørrer

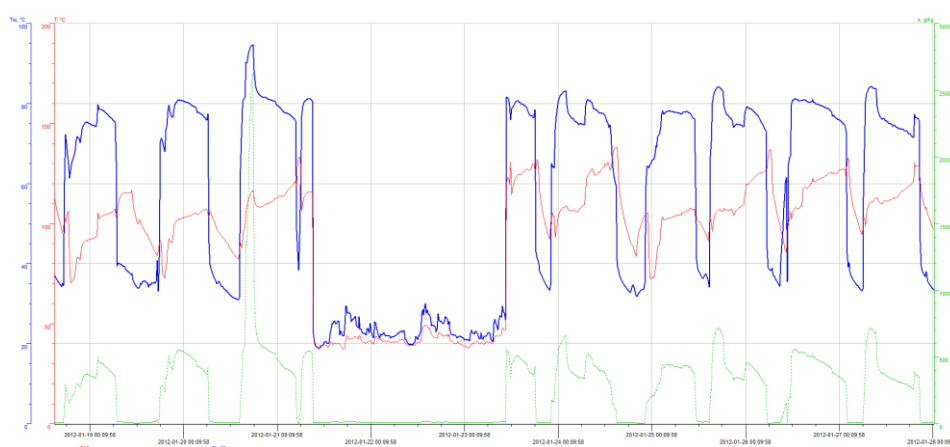
Tørreren består af et tørrerum, hvor produktet er stablet på vogne, der kan køres ind i tørrerummet. Luften i tørrerummet cirkuleres rundt af en blæser og opvarmes i en varmeveksler, hvor der kondenseres vanddamp på varmesiden. Efterhånden som produktet og luften bliver opvarmet mere og mere, bliver luften mere mættet med vanddamp. I aftrækket fra tørreren sidder et spjæld, der

åbner, hvis temperaturen i tørrerummet bliver for høj. På denne måde regulerer spjældet temperaturen i tørrerummet. Tørrerene hos Skamol består af to tørrere, en fortørrer og en eftertørrer.

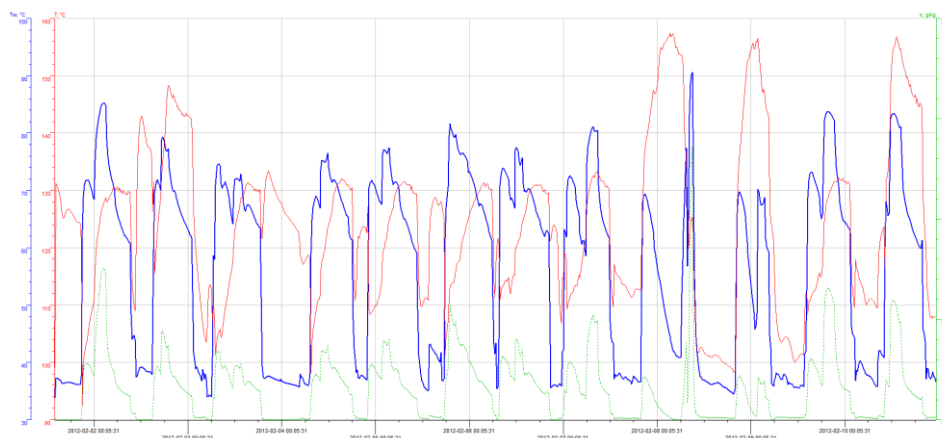
Tørrerens ydelse bliver målt henholdsvis på damp siden ved at måle kondensatflowet ud af dampvarmeveksleren og på tryk og temperatur af dampen før og efter varmeveksleren. Ydelsen er en beregnet middelværdi målt over cirka en uge.

Batch tiden for de to tørrere er:

- Fortørrer 13 timer
- Eftertørrer 12 timer



Figur 45 Måling af tør og våd temperatur i afkastluften fra fortørreren



Figur 46 Måling af tør og våd temperatur i afkastluften fra eftertørreren

Figur 44 og 45 viser målinger af den våde og den tørre temperatur i afkastluften for henholdsvis fortørrer og eftertørrer. Ud fra disse værdier kan det gennemsnitlige vandindhold i afkastluften beregnes til  $X = 340 \text{ g/kg}$  i fortørreren og  $X = 68,5 \text{ g/kg}$  i eftertørreren.

Massestrømmen af afkastluften er ligeledes blevet målt ved at måle hastigheden af afkastluften i røret for derefter at omsætte denne til en massestrøm.

Zone	$t_{wb}$ [°C]	$t_{db}$ [°C]	$p_d$ [Pa]	$q$ [m³/s]	$q$ [kg/s]	E [kW]
Fortørrer Zone 1	79,2	103	87	0,44	0,4	438
Fortørrer Zone 2	71,7	120,8	235	0,7	0,6	485
Eftertørrer Zone 1	75,1	109	240	0,73	0,66	585
Eftertørrer Zone 2	75,5	108,1	125	0,52	0,47	432

Massestrøm af vand i afkastluften:

Fortørrer:  $M_{\text{vand}} = (q_1 + q_2) \cdot x = (0,4 + 0,6) \cdot 0,340 = 0,34 \text{ kg vand/s}$

Eftertørrer:  $M_{\text{vand}} = (q_1 + q_2) \cdot x = (0,66 + 0,47) \cdot 0,0685 = 0,077 \text{ kg vand/s}$

Den totale mængde vand, der fordampes på en batch bliver:

Fortørrer:  $M_{\text{vandtot}} = 0,34 \text{ kg/s} \cdot 3600 \text{ s} \cdot 13 \text{ h} = 159500 \text{ kg vand/batch}$

Eftertørrer:  $M_{\text{vandtot}} = 0,077 \text{ kg/s} \cdot 3600 \text{ s} \cdot 12 \text{ h} = 3300 \text{ kg vand/batch}$

Kondensatflowet på damp siden af dampvarmeveksleren er blevet målt på forstørreren, og det gennemsnitlige kondensatflow over en batch har været 754 kg/h, hvilket svarer til følgende damp- og energimængde for to dampvarmevekslere over en batch:

Massedamp =  $2 \cdot 754 \text{ kg/h} \cdot 13 \text{ h} = 19.600 \text{ kg damp/batch}$

Energi =  $19.600 \cdot 2500 \text{ kJ/kg} = 49 \text{ GJ}$

Det giver et energiforbrug pr. kg fordampet vand på:

$$49 \cdot 10^6 \text{ kJ} / 15.900 \text{ kg} = \mathbf{3.080 \text{ kJ/kg}}$$

I forholdt til vands fordampningsvarme giver det en tørreeffektivitet på:

$$3.080 \text{ kJ/kg} / 2.250 \text{ kJ/kg} = \mathbf{73 \%}$$

Luftmålingerne viser en samlet energimængde i udsugningen på:

$$(438 + 485) \text{ kW} = \mathbf{923 \text{ kW}}$$

Dampflowmålingen viser en energitilsætning på:

$$754 \text{ kg/h} \cdot 2.250 \text{ kJ/kg} / 3600 \cdot 2 \text{ stk.} = \mathbf{942 \text{ kW}}$$

Der er altså god overensstemmelse mellem luftmålingerne og dampflowmålingerne. Disse anses derfor som valide.

Disse resultater vil således blive forsøgt simuleret med programmet.

### 4.3.1 Simulering af målesituation

I figur 46 er værdierne, der menes reelle, forsøgt indsat. På denne måde kan modellens output kontrolleres i forhold til virkeligheden.

#### Calculation of the energy consumption for batch dryer at atmospheric pressure

**Main inputs to model**

<b>Initial conditions</b>		<b>Surroundings</b>	
Solid temperature, $T_{S,0}$ [°C]	<input type="text" value="30"/>	Temperature of surroundings, $T_{inf}$ [°C]	<input type="text" value="25"/>
Solid moisture content, $X_0$ [kg/kg]	<input type="text" value="2,71"/>	Relative humidity of surroundings, $\phi_{inf}$ [%]	<input type="text" value="50"/>
<b>Integration</b>		<b>Auxiliary inputs</b>	
Required moisture content, $X_{stop}$ [kg/kg]	<input type="text" value="0,15"/>	Blower efficiency, $\eta$ [-]	<input type="text" value="0,7"/>
Integration stop time [s]	<input type="text" value="300000"/>	Blower volume flow, $\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /s]	<input type="text" value="25"/>
Time increment for integration table [s]	<input type="text" value="60"/>	Exhaust factor (part of circulation), $F$ [-]	<input type="text" value="0,05"/>

**Detailed inputs to model**

Geometry and Properties

Blower, Piping and Control

Drying modeling

Simulation and Help

Calculate

Help and Documentation

Results

Drying plots

I,x diagram

Save and load inputs

Save

Load

**Main model outputs**

<b>Main results</b>		<b>Total mass of solid and moisture flows</b>	
Drying time [s]	<input type="text" value="102300"/>	Mass of solid, $M_S$ [kg]	<input type="text" value="6686"/>
Final moisture content, $X$ [kg/kg]	<input type="text" value="0,1494"/>	Mass of residual moisture, $M_{W,res}$ [kg]	<input type="text" value="1006"/>
Heat consumption, $E_{heat}$ [kWh]	<input type="text" value="10273"/>	Mass of evaporated water, $M_{W,evap}$ [kg]	<input type="text" value="17115"/>
Blower power consumption, $W$ [kWh]	<input type="text" value="19,41"/>	Moisture infiltration, $M_{W,infiltration}$ [kg]	<input type="text" value="858,9"/>
Total volume flow through blower, $V$ [m <sup>3</sup> ]	<input type="text" value="2,543E+06"/>	Moisture exhaust, $M_{W,exhaust}$ [kg]	<input type="text" value="17973"/>

Figur 47 Input til beregning af energiforbrug og tørretider for Skamol batch tørrer.

### 4.3.2 Kommentarer til output

#### Drying time:

$102.300/3600 = 28$  timer.

#### Kommentar:

I forhold til at der reelt køres en batchtid på ca. 25 timer på både fortørrer og eftertørrer, virker det højt, men dog inden for 10%. Dette skyldes nok, at der muligvis ikke tørres helt så langt ned som forventet.

#### Heat consumption:

$10.273 \text{ kWh} = 37 \text{ GJ}$

#### Kommentar:

I forhold til den fordampede mængde vand på 17.115 kg giver det en energimængde pr. kg på 2.161 kJ/kg. Dette virker for lavt taget i betragtning, at man arbejder ved atmosfæretryk, og at der ikke kan regnes med 100% virkningsgrad af systemet.

#### Blower powerconsumption:

19,41 kWh

#### Kommentar:

Hvis man kigger på graferne, ser man, at det er netop 19,41 kW. Dette betyder, at energiforbruget er:

$E = 19,41 \text{ kW} \cdot 28 \text{ timer} = 544 \text{ kWh}$

#### Moisture exhaust:

17.973 ton

#### Kommentar:

Ud fra målinger regnes der frem til 15.900 kg/batch. Dette passer rimeligt. Ud fra tørretiden kan det også tyde på, at der muligvis ikke tørres helt så langt ned som forventet.

## 5 Konklusion

I dette projekt er der udviklet et beregningsværktøj til beregning af energiforbruget i forskellige tørreprocesser - primært tørreprocesser med luft. Programmet kan anvendes til at bestemme energiforbruget for en aktuel tørreproces, hvorefter det kan beregnes, hvor meget energi, der kan spares ved forskellige tiltag. Programmet giver et hurtigt overblik over hvilket potentiale der kan opnås.

Der er ligeledes udviklet et beregningsværktøj til simulering af en batch tørrer, der beregner tørringen af en batch afhængig af tiden.

Programmerne har vist deres anvendelighed i forbindelse med tre cases, som er gennemgået i rapporten. I projektet er der gennemført målinger på fire forskellige tørrere, og energiforbruget er beregnet ved hjælp af "DryPack". Med "DryPack" er det muligt at finde besparelspotentialer ved at optimere tørreprocesserne.

I program pakken indgår hjælpeprogrammer til beregning af fugtig luft.

1. Beregning af fugtig lufts termodynamiske egenskaber
2. Enhedsoperation med fugtig luft (Blanding, opvarmning, afkøling og befugtning)
3. Beregning af relativ ændring af tørretiden ved ændring af procesparametre
4. IX diagram ved temperaturer over 100°C

I 2012 blev projektets resultater formidlet på International Drying Conference i Kina, og resultaterne vil ligeledes blive formidlet på Nordic Drying Conference 2013 i Tåstrup med to papers. Herudover vil projektet blive vist på Energiens Topmøde i sommeren 2013.